Robert C. Berwick - Noam Chomsky

¿POR QUÉ SOLO NOSOTROS?

Evolución y lenguaje

Kairós

Robert C. Berwick - Noam Chomsky

¿POR QUÉ SOLO NOSOTROS?

Lenguaje y evolución

Traducción del inglés de Fina Marfà

editorial Kairós

Título original: Why Only Us by Robert Berwick and Noam Chomsky

© 2016 Robert C. Berwick and Noam Chomsky

© de la edición en castellano:
2016 by Editorial Kairós, S.A.
www.editorialkairos.com

© Traducción del inglés al castellano: Fina Marfà
Revisión: Amelia Padilla
Primera edición: Octubre 2016

ISBN: 978-84-9988-526-1
Depósito legal: B 16.186-2016

Fotocomposición: Grafime. Mallorca 1. 08014 Barcelona
Tipografía: Times, cuerpo 11, interlineado 12,8

Diseño cubierta: Katrien Van Steen
Imagen cubierta basada en la idea de Kumi Yamashita
Impresión y encuadernación: Rornanyà-Valls. Verdaguer, 1. 08786 Capellades

Este libro ha sido impreso con papel certificado FSC, proviene de fuentes respetuosas con la sociedad y el medio ambiente y cuenta con los requisitos necesarios para ser considerado un "libro amigo de los bosques".

Todos los derechos reservados.
Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita algún fragmento de esta obra.

SUMARIO

Agradecimientos 7

1. ¿Por qué ahora? 9
2. La biolingüística evoluciona 65
3. La arquitectura del lenguaje y su importancia para la evolución 103
4. Triángulos en el cerebro 125

Notas 189
Bibliografía 199

AGRADECIMIENTOS

La evolución, tal como la conocemos, no sería posible sin cambio, variación, selección y herencia. Este libro no es una excepción. Hemos tenido la suerte de que muchas personas nos sugirieron cambios, nos propusieron introducir modificaciones y eliminaron las mutaciones perjudiciales. Sin embargo, como todo en biología, la evolución, incluso la selección artificial, sigue siendo imperfecta. Solo nosotros, no nuestros genes, ni desde luego ninguna de las personas que nos han ayudado, somos los responsables de todas las imperfecciones restantes. Si algún día estos capítulos llegan a convertirse en un «órgano de perfección extrema» será solo gracias a las modificaciones futuras, sucesivas, múltiples, mínimas, o no tan mínimas. El tiempo tendrá la última palabra. Esperamos poder transmitir lo valioso que puedan contener estas páginas a la próxima generación, que tal vez resuelva definitivamente el enigma de la evolución del lenguaje.

El cambio evolutivo innovador es el más arduo de todos. Estamos en deuda con Marilyn Matz por su genial idea de escribir este libro. También queremos dar las gracias a la Real Academia Holandesa de Artes y Ciencias, por su apoyo al congreso donde vieron la luz por primera vez los capítulos 3 y 4, así como a todos los responsables de su organización: Johan Bolhuis, Martin Everaert y Riny Huybrechts. Existe

una versión un poco distinta del capítulo 2, publicado en *Biolinguistic Investigations*, editado por Anna Maria Di Sicullo y Cedric Boeckx en Oxford University Press.

1. ¿POR QUÉ AHORA?

Nacemos llorando, pero esos gritos anuncian los primeros latidos de la lengua. El llanto de un bebé alemán refleja la melodía de la lengua alemana; los bebés franceses reflejan el habla francesa (parece que adquirida *in utero* [Mampe *et al*., 2009]). Más o menos un año después de haber nacido, los bebés dominan el sistema de sonidos de su lengua; unos pocos años más tarde, entablan conversaciones con quienes los atienden. Esta singular capacidad propia y específica de nuestra especie para adquirir cualquier lengua humana –la facultad del lenguaje– plantea importantes preguntas de orden biológico desde hace mucho tiempo, entre ellas las siguientes: ¿Cuál es la naturaleza del lenguaje? ¿Cómo funciona? ¿Cómo ha evolucionado?

Esta colección de ensayos aborda la tercera pregunta: la evolución del lenguaje. A pesar de las afirmaciones contrarias, lo cierto es que la evolución del lenguaje siempre ha despertado un gran interés, desde los comienzos de la gramática generativa a mediados del siglo xx. La gramática generativa trató, por primera vez, de dar una explicación clara sobre las lenguas –gramáticas–, que aclarase lo que llamaremos «propiedad básica del lenguaje»: que un lenguaje es un sistema computacional finito capaz de producir infinitas expresiones, cada una de las cuales tiene una interpretación definida en lo

sistemas semántico-pragmático y sensoriomotor (más llanamente, pensamiento y sonido). La primera vez que se abordó este problema, la tarea parecía abrumadora. Los lingüistas se pelearon por construir gramáticas apenas suficientes, y los resultados fueron tan complejos que en aquel momento estaba claro que no sería posible que evolucionaran. Por esta razón, los debates sobre la evolución del lenguaje rara vez fueron publicados, aunque hubo algunas excepciones notables.

¿Qué ha cambiado? Para empezar, la teoría lingüística ha madurado. Los complejos sistemas de reglas lingüísticas ya son cosa del pasado; han sido sustituidos por enfoques mucho más simples y, por tanto, más plausibles evolutivamente. Además, ciertos componentes biológicos clave asociados al lenguaje, en concreto el sistema de «entrada-salida» del aprendizaje y producción vocal que constituye parte del sistema que llamaremos de «exteriorización», se han aclarado biológica y genéticamente, hasta el punto de que podemos utilizar eficazmente una estrategia de «divide y vencerás» y dejar a un lado el aspecto sensoriomotor de la exteriorización para focalizar las propiedades más centrales del lenguaje.

Aunque es mucho lo que seguirá siendo incierto, simplemente porque carecemos de las pruebas necesarias, los cambios en la teoría lingüística en las dos últimas décadas han aclarado notablemente diferentes aspectos del origen del lenguaje. En concreto, hoy tenemos buenas razones para creer que un componente clave del lenguaje humano –el motor básico que permite que funcione la sintaxis de las lenguas– es mucho más sencillo de lo que la mayoría pensaba hace apenas unas décadas. Es un resultado bien recibido, tanto por la biología evolutiva como por la lingüística. Los biólogos saben muy bien que cuanto más restringidamente se defina el «fenotipo», literalmente, la «forma que se muestra» hacia fuera, mejor será nuestra comprensión biológica sobre cómo puede haber evolucionado ese fenotipo; e igualmente, menor

será la brecha entre nosotros y otras especies que carecen de lenguaje. Con este fenotipo mejor definido, podemos empezar a resolver el dilema que, desde un principio, entorpeció la explicación darwiniana de la evolución del lenguaje.

En diferentes sitios se le ha llamado el «problema de Darwin» o, más apropiadamente, el «problema de Wallace», que fue el codescubridor de la evolución por la selección natural, Alfred Russel Wallace. Wallace fue el primero en llamar la atención sobre las dificultades que tendría cualquier explicación convencional darwiniana y adaptacionista del lenguaje humano, puesto que no veía ninguna función biológica que no pudieran ejercer las especies carentes lenguaje.[1]

En efecto, el lenguaje plantea un grave problema a la explicación evolutiva. Por un lado, el pensamiento darwinista en general requiere una ascendencia gradual de un antepasado a través de una secuencia de ligeras modificaciones. Por el otro, dado que ningún otro animal posee lenguaje, parece que sea un salto biológico, que transgrede el principio de Darwin y Linneo, *natura non facit saltum*: «Porque la selección natural solamente actúa aprovechando ligeras y sucesivas variaciones; nunca da un salto, sino que avanza a pasos lo más cortos y lentos» (Darwin, 1859: 194). Creemos firmemente que esta tensión entre la continuidad darwiniana y el cambio puede solucionarse. Es uno de los objetivos clave de estos ensayos.

¿Qué hay de Darwin? Sin dudar jamás de sus sólidos principios sobre el cambio evolutivo infinitesimal y la continuidad, el propio Darwin, en su obra *El origen del hombre* (1871), propuso una teoría «Caruso» que explicara la evolución del lenguaje: los hombres que cantaban mejor eran los escogidos sexualmente por las mujeres, lo cual, a su vez, llevaba a la perfección del aparato vocal, como la cola del pavo real. Una mejor competencia vocal acompañó un aumento general del tamaño del cerebro, que, a su vez, desembocó en el lenguaje; el lenguaje utilizado para el pensamiento interno mental:

> Ejercitada cada vez más la voz, los órganos vocales se robustecieron y perfeccionaron en virtud del principio de los efectos hereditarios del uso; y ello, a su vez, debió influir en la capacidad de habla. Pero no hay duda de que la relación entre el uso continuo del lenguaje y el desarrollo del cerebro tuvo mucha más importancia. Las aptitudes mentales debían de estar mucho más desarrolladas en un primitivo progenitor del hombre que en cualquiera de los monos que existen hoy día, incluso antes de que se utilizara cualquier forma de lenguaje, por muy imperfecta que esta fuera. Pero podemos admitir con seguridad que el uso continuado y el progreso de esa capacidad influyeron en la mente, haciendo posible y facilitándole el enlace de series largas de ideas. Sin la ayuda de palabras, emitidas o no, no puede realizarse una sucesión larga y compleja de pensamientos, lo mismo que no puede hacerse un cálculo largo sin utilizar cifras o valerse del álgebra. (Darwin, 1871: 57).

Últimamente, la teoría darwiniana de Caruso ha experimentado cierto resurgimiento. De hecho, uno de nosotros (Berwick) propuso una versión actualizada en el primer congreso Evolang en Edimburgo, en 1996, basada en la teoría lingüística moderna de la estructura métrica.[2] Más recientemente, quizá quien ha hecho más por defender una versión de la teoría del «protolenguaje musical» de Darwin ha sido Fitch (2010). Como dice Fitch, la teoría de Darwin era notoriamente profética y moderna en muchos aspectos. Compartimos con Darwin el punto de vista del pasaje citado más arriba de que el lenguaje está estrechamente relacionado con el pensamiento, una «herramienta interna mental» en palabras de la paleoneuróloga Harry Jerison (1973: 55). En el capítulo 3 damos respaldo lingüístico empírico a esta posición.

Contrario a ciertos puntos de vista, el debate sobre la evolución del lenguaje como un «problema de Darwin» no fue un tema tabú hasta su «resurgimiento» en la década de

1990: parecía un pariente extraño que se hubiera ocultado en un desván durante 30 años. En cambio, suscitó un gran interés en Cambridge, Massachusetts, durante las décadas de 1950 y 1960 y, después, a lo largo de toda la década de 1970. Este profundo interés se refleja claramente en el prólogo que Eric Lennenberg escribió en septiembre de 1966 para su obra *Fundamentos biológicos del lenguaje* (1967: viii), en la que se refiere a su deuda «en los últimos 15 años» con una lista de nombres famosos y conocidos: Roger Brown, Jerome Bruner, George Miller, Hans Teuber, Philip Liberman, Ernst Mayr, Charles Gross, y también Noam Chomsky. En nuestra opinión, el libro de Lenneberg sigue siendo muy pertinente hoy en día; en particular, su capítulo 6, «El lenguaje visto desde la evolución y la genética», sigue siendo un modelo de pensamiento evolutivo matizado, así como su trabajo aún más temprano (Lenneberg 1964). En cierto modo, nuestro ensayo actualiza lo que ya escribió Lenneberg.

Por lo que sabemos de esta historia, fue Lenneberg quien proféticamente propuso un estudio longitudinal del habla que se utiliza con los niños [*child-directed speech*]; descubrió la invención espontánea del lenguaje de signos como una lengua humana completa (en la Perkins School for the Deaf, en Watertown, Massachusetts); vio que la adquisición del lenguaje se producía aun a pesar de patologías evidentes; presentó las pruebas sobre un período crítico para la adquisición del lenguaje; observó disociaciones entre la sintaxis del lenguaje y otras capacidades cognitivas; acuñó terminología moderna, como «cerebro preparado para el lenguaje» [*language-ready brain*]; utilizó el análisis genealógico del historial en familias con discapacidades del lenguaje, haciéndose eco de los datos del *FOXP2* para proporcionar pruebas de que lengua tiene un componente genético; y señaló que «no hay necesidad de suponer "genes del lenguaje"» (Lenneberg, 1967: 265). También comparó los enfoques continuo y discontinuo de la

evolución del lenguaje; y se posicionó a favor del discontinuo, basándose en parte en pruebas clave como la aparente uniformidad de la facultad del lenguaje: «Dada la idéntica capacidad para el lenguaje en todas las razas, este fenómeno debía existir antes de la diversificación racial» (Lenneberg, 1967: 266).

Lo cierto es que el interés por el tema del lenguaje y su evolución nunca se ha interrumpido. Desde luego, en las décadas de 1950 y 1960 no se podía decir mucho más sobre la evolución del lenguaje de lo que escribió Lenneberg. Las típicas gramáticas generativas del momento consistían en un sinnúmero de reglas complejas, ordenadas y transformacionales. Un vistazo al apéndice II de *Estructuras sintácticas* (1957) de Chomsky, con sus 26 detalladísimas reglas para un fragmento de lengua inglesa, pone de manifiesto inmediatamente dicha complejidad. A pesar de ello, el interés por la evolución del lenguaje no disminuyó, y periódicamente se organizaron importantes congresos sobre el tema. Por ejemplo, la conferencia internacional que se celebró en 1975 en la Academia de Ciencias de Nueva York (Hamad, Steklis y Lancaster, 1976). Por esa época, a partir de mediados de la década de 1960 y en adelante, se entendió que, si bien los sistemas de reglas complejas, que variaban radicalmente de una lengua a otra, sí que respondían a la necesidad de una descripción adecuada de cada lengua en particular, no resolvían el misterio de la facilidad con la que los niños adquieren la lengua, sea cual sea. Se comprendió que algunos de aquellos misterios podían resolverse si se descubrían las limitaciones del sistema biológico para la adquisición del lenguaje –limitaciones en la gramática universal o GU, la teoría del componente genético de la facultad del lenguaje–.[3] En 1975, en el congreso de la Academia de Nueva York sobre la evolución del lenguaje, uno de nosotros (Chomsky) señaló, igual que al comienzo de este capítulo, que según parece existen limitaciones que restringen el «fenotipo» del lenguaje, y debido a ello se reduce

el objetivo de la evolución. Por ejemplo, las reglas lingüísticas a menudo están restringidas a campos concretos, por lo que podemos decir *[¿A] quién hizo Mary creer que Bill quería que ella viera?*, en donde *quién* se interpreta como el objeto de *ver*, pero esto es imposible cuando *quién* está en un oración sustantiva como *[¿A] quién hizo Mary creer la afirmación de que John* vio? (Chomsky, 1976: 50). (Véase también el capítulo 4). Tal como concluyó su exposición, «Hay muchas razones para suponer que este órgano mental, el lenguaje humano, se desarrolla de acuerdo con sus características genéticamente determinadas, con algunas modificaciones menores que dan una u otra lengua» (Chomsky, 1976: 56). Cuestiones como estas surgieron en cuanto se intentó construir una gramática generativa aunque solo fuera de una sola lengua.

Durante los 10 años siguientes, el ritmo de este tipo de descubrimientos se aceleró, y se reunió un número considerable de restricciones sistemáticas en la GU que se dieron a conocer como «Marco teórico de Principios y Parámetros» (P & P). En el modelo de P & P, las reglas de transformación detalladas en las *Estructuras Sintácticas* –por ejemplo, la «regla pasiva», que en inglés cambia la posición del sintagma nominal de objeto a sujeto, o la norma que desplaza palabras como *who [quién]* al principio de la frase interrogativa en inglés– se combinaron en una sola operación, «Mueve cualquier sintagma» («Mueve alfa»), junto con un conjunto de restricciones que descartaban movimientos prohibidos, como una forma más general de la restricción descrita en el párrafo anterior para las palabras con *wh* como *who* o *what*. Todo esto se parametrizaba mediante un número finito de perturbaciones permitidas que reflejaban las diferencias entre lenguas diferentes; por ejemplo, que el japonés es una lengua con el verbo en posición final, pero que el inglés y el francés son lenguas con el verbo en posición inicial. La teoría lingüística adoptó ciertos tintes de tabla periódica, la combinación de átomos en

posibles moléculas, como se observa en explicaciones como la de Mark Baker (2002).

En la década de 1990, con el modelo de los Principios y Parámetros dando cuenta de un considerable número de variaciones translingüísticas, fue posible por primera vez distanciarse un poco para ver si era posible reducir tanto las reglas como las restricciones a un conjunto lo más pequeño posible que pudiera estar motivado independientemente, como por los principios de la computación eficiente u óptima. Esta búsqueda del sistema más *simple* o más *mínimo* para el lenguaje humano ha traído consigo una notable simplificación, un fenotipo más reducido del lenguaje.

¿Cómo podemos caracterizar este fenotipo más reducido? Los últimos 60 años de investigación en gramática generativa han revelado varios de los principios básicos, y en gran parte indiscutibles, del lenguaje humano. La estructura sintáctica del lenguaje humano tiene al menos tres propiedades clave, todas ellas reflejadas en supuestos minimalistas del sistema: 1) la sintaxis del lenguaje humano es jerárquica, ignora las consideraciones de orden lineal, y reserva las restricciones de ordenación lineal para la exteriorización; 2) las estructuras jerárquicas particulares asociadas con oraciones afectan a su interpretación, y 3) no hay un límite superior en la profundidad de las estructuras jerárquicas relevantes. Téngase en cuenta que si todo esto es verdad, entonces la observación 1 implica que cualquier teoría lingüística suficiente debe tener *alguna* manera de construir series de expresiones estructuradas jerárquicamente, ignorando el orden lineal; mientras que 2 implica que la estructura fija (en parte) la interpretación en el nivel del «significado». Por último, la observación 3 implica que estas expresiones son potencialmente infinitas. Estas son, pues, las características mínimas que tiene que abarcar cualquier teoría sintáctica suficiente y, por eso, forman parte de la explicación minimalista.

Veamos cómo estas propiedades efectivamente están contenidas en el lenguaje tomando un ejemplo sencillo, que utilizaremos más adelante en los capítulos 3 y 4: comparemos *los pájaros que vuelan instintivamente nadan* con *instintivamente los pájaros que vuelan nadan*. La primera oración del ejemplo es ambigua. El adverbio *instintivamente* puede modificar tanto a *vuelan* como a *nadan*, es decir, puede ser que los pájaros vuelen instintivamente o también que naden instintivamente. Fijémonos ahora en la segunda oración. Colocando *instintivamente* al principio de la oración cambiamos el juego. En *instintivamente* los pájaros que vuelan *nadan*, resulta que *instintivamente* solo puede modificar a *nadan*. No puede modificar a *vuelan*. Misterioso. A fin de cuentas, *instintivamente* está más cerca de *vuelan*, en cuanto al número de palabras que median, que de *nadan*; entre *instintivamente* y *vuelan* solo hay dos palabras que median, mientras que entre *instintivamente* y *nadan* hay tres. Sin embargo, la gente no asocia *instintivamente* a la más cercana *vuelan*, sino que asocia *instintivamente* con la más lejana *nadan*. La razón es que *instintivamente*, en realidad, está más cerca de *nadan* que de *vuelan* en términos de distancia estructural. *Nadan* está incrustada a un primer nivel de profundidad respecto a *instintivamente*, mientras que *vuelan* está incrustada a un nivel más abajo que *nadan*. (Véase la imagen de la figura 4.1 en el capítulo 4). Parece que la distancia lineal no es la que importa en la sintaxis humana, solo importa la distancia estructural.

Las propiedades jerárquicas no solo llevan la batuta de la sintaxis humana, realmente no tienen límite superior, aunque, desde luego, la dificultad de procesamiento puede aumentar, como, por ejemplo, en un caso como *intuitivamente la gente sabe que instintivamente los pájaros que vuelan nadan*. Si suscribimos la tesis de Church-Turing, junto con el supuesto de que el cerebro es finito, entonces no tenemos escapatoria: *necesitamos* una noción de recursividad para describir ade-

cuadamente estos fenómenos. Esto es indiscutible. Juntas, estas tres propiedades establecen los requisitos mínimos para una teoría adecuada y suficiente de la sintaxis del lenguaje humano.

Sin embargo, el debate contemporáneo sobre neurociencia de los primates a veces ha negado explícita y rotundamente cada una de estas afirmaciones, sosteniendo que solo son necesarias restricciones relativas al orden lineal, y, además, que no hay necesidad de apelar a restricciones jerárquicas o a una noción de recursividad. Esta posición tiene importantes implicaciones, tanto para la investigación neurobiológica del lenguaje como para la modelización evolutiva. Pero es incorrecta.

Por ejemplo, Bornkessel-Schlesewsky y sus colegas (Bornkessel-Schlesewsky *et al*., 2015) defienden la continuidad entre humanos y otros primates sobre esta base: «No suscribimos la idea […] de que un mecanismo computacional más elaborado y cualitativamente distinto (es decir, una infinitud discreta producida por la recursividad) sea necesario para el lenguaje humano. […] La habilidad para combinar dos elementos A y B atendiendo a un orden para producir la secuencia AB constituye la base computacional de la capacidad de procesamiento […] en el lenguaje humano (2015: 146).

Llegan a una conclusión evolutiva potencialmente crucial: «Existen pruebas convincentes que sugieren que la arquitectura computacional del primate no humano […] es cualitativamente suficiente para realizar las computaciones necesarias» (2015: 143). Si esto es verdad, puede tener profundas consecuencias evolutivas. A continuación, «los prerrequisitos biológicos computacionales básicos para el lenguaje humano, incluyendo el procesamiento de oraciones y discurso, están presentes en los primates no humanos» (2015: 148).

Pero, como acabamos de ver, las afirmaciones de Bornkessel-Schlesewsky están completamente equivocadas. El procesamiento lineal ni siquiera está cerca de ser suficiente para el

lenguaje humano. Esto significa que los mecanismos de los primates identificados en la obra de Bornkessel-Shlesewsky *et al*. son, *en principio, insuficientes* para explicar lo que normalmente encontramos en el lenguaje humano. Y si esto es correcto, convierte el cerebro de los primates no humanos en malos candidatos a modelo de muchos de los aspectos del lenguaje humano.

Recapitulemos, pues, lo que nos dice nuestro análisis minimalista. En el mejor de los casos, queda una sola operación para construir la estructura jerárquica necesaria para la sintaxis del lenguaje humano, el «ensamble». Esta operación toma dos elementos sintácticos cualesquiera y los combina en una nueva expresión más estructurada jerárquicamente.

En sus términos más simples posibles, la operación de ensamble es ni más ni menos que la formación de conjuntos. Dado un objeto sintáctico *X* (ya sea un átomo-palabra, o algo que sea en sí mismo producto del ensamble) y otro objeto sintáctico *Y*, la operación «ensamble» forma un objeto nuevo, estructurado jerárquicamente como conjunto {X, Y}; al nuevo objeto sintáctico también le es asignada una etiqueta mediante un algoritmo que satisfaga la condición de computación mínima. Por ejemplo, supongamos *leer* y *libros*, la operación de ensamble combina estos dos elementos en {leer, libros}, y el resultado es etiquetado mediante una búsqueda mínima, que localiza las características del «primer elemento» de la combinación, en este caso, las características del elemento verbal *leer*. Ello concuerda con la noción tradicional de que la estructura constituyente de leer libros es un «sintagma verbal». Esta nueva expresión sintáctica puede ahora entrar en más computaciones, y reflejar lo que antes hemos denominado «propiedad básica» del lenguaje humano.

Volveremos sobre este aspecto en los siguientes capítulos, por el momento lo que tiene que quedar claro es que restringir el foco al fenotipo de este modo, aligera la carga de la expli-

cación de la teoría evolutiva, simplemente porque al reducir la paradoja darwiniana no hay tanto que explicar. Este reciente refinamiento y reducción del fenotipo del lenguaje humano es la primera motivación de esta colección de ensayos.

La segunda motivación es que ha mejorado nuestra comprensión de la base biológica del lenguaje. Ahora sí que podemos utilizar una estrategia de «divide y vencerás» para partir el difícil problema evolutivo del «lenguaje» en las tres partes descritas según la «propiedad básica»: 1) un sistema computacional interno que construye expresiones estructuradas jerárquicamente mediante interpretaciones sistemáticas en las interfaces con otros dos sistemas internos, concretamente, 2) un sistema sensoriomotor para la exteriorización, como la producción sintáctica o el análisis sintáctico, y 3) un sistema conceptual para la inferencia, la interpretación, la planificación y la organización de la acción, lo que informalmente llamamos «pensamiento». Es importante señalar que la exteriorización incluye mucho más que el solo aprendizaje y producción vocal/motor, y que abarca como mínimo aspectos del lenguaje como la formación de palabras (morfología) y su relación con los sistemas de sonido del lenguaje (fonología y fonética), el reajuste del *output* para disminuir la carga de memoria durante la producción y la prosodia.

Pero más importante aún, según nuestro punto de vista, en el caso del lenguaje, es que aparentemente cualquier modalidad sensorial se puede utilizar para la entrada (*input*) o la salida (*output*), ya se trate de sonidos, signos o tacto (por suerte, el olfato no forma parte de la lista). Téngase en cuenta que la estructura jerárquica interna en sí no contiene información sobre el *orden* de izquierda a derecha de las frases, las palabras u otros elementos. Por ejemplo, las posibilidades de verbo-objeto u objeto-verbo que distinguen el japonés del inglés y el francés ni siquiera están representadas en la estructura jerárquica interna. En cambio, la ordenación temporal

secuencial del lenguaje viene impuesta por las exigencias de la exteriorización. Si la modalidad es auditiva, esta salida (*output*) recibe el nombre más familiar de habla e incluye el aprendizaje y la producción vocal. Sin embargo, la modalidad de salida (*output*) también puede ser visual y motora, como en los lenguajes de signos.

Gracias en parte a los estudios comparativos y a los neurofisiológicos y genómicos con pájaros cantores, la base biológica del aprendizaje vocal está en camino de ser entendida como un sistema evolutivamente convergente: en las aves y en nosotros evolucionó de un modo idéntico aunque independiente. Es muy posible que el aprendizaje vocal –la capacidad de aprender sonidos distintivos y ordenados– cuente con la participación de alrededor de 100-200 genes (Pfenning *et al*., 2014). Parece ser que el aprendizaje vocal, tanto referido al canto de los pájaros como al aprendizaje vocal en los mamíferos, se produce en una neurobiología distintiva, proyecciones de las regiones motoras de la corteza cerebral hacia las neuronas motoras vocales del tronco encefálico, como se muestra en la mitad superior de la figura 1.1. Estas proyecciones directas brillan por su ausencia en los animales sin aprendizaje vocal como el pollo o el macaco, como se muestra en la mitad inferior de la figura 1.1.[4]

Hallazgos más recientes de Comins y Gentner (2015) y de Engresser *et al*. (2015) sugieren que esta capacidad de aprendizaje va más allá de la simple secuenciación. Comins y Gentner informan de que la formación de categorías abstractas hallada en los estorninos recuerda los sistemas de sonidos humanos, mientras que Engresser y sus colegas afirman haber encontrado una especie de aves, el *Pomatostomus ruficeps*, que presenta «contrastes fonémicos». Dicha posibilidad específica de esta especie ya fue anticipada por Caen (2006). Más recientemente todavía, Takahashi *et al*. (2015) han informado de que los bebés de titís «definen» sus vocalizaciones

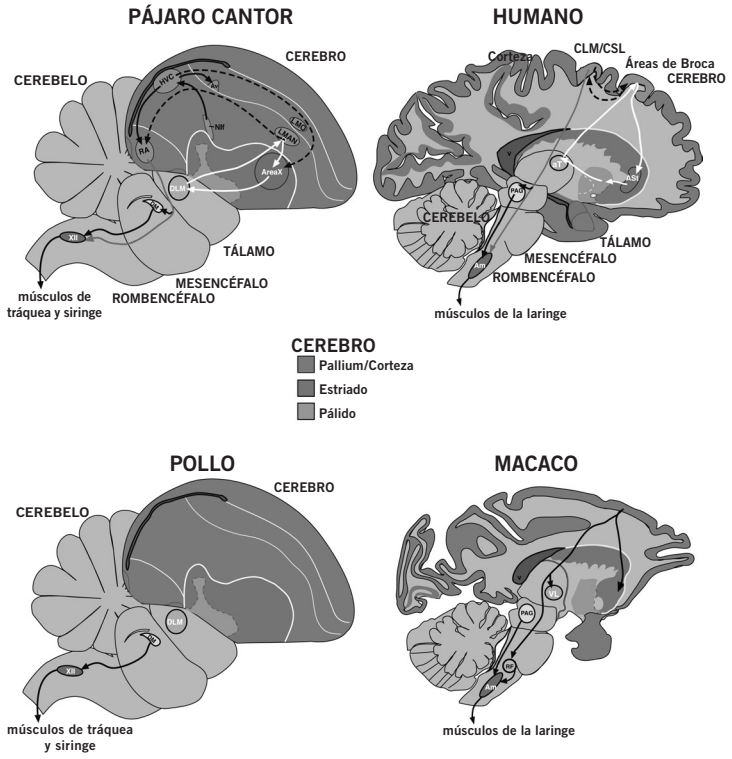

Figura 1.1 (lámina 1)

Comparación de relaciones cerebrales, conectividad y tipos de células entre individuos con aprendizaje vocal y sin aprendizaje vocal. Arriba: Solo los individuos con aprendizaje vocal (pinzón zebra macho, humanos) tienen una proyección directa desde la corteza vocal motora hasta las neuronas motoras vocales del tronco encefálico, como indican las flechas rojas. Abreviaturas: (Pinzón) RA: núcleo robusto del arcopalio. (Humano) CLM: corteza motora laríngea en la circunvolución precentral. CSL: corteza somatosensorial laríngea. Abajo: Los individuos sin aprendizaje vocal (pollo, macaco) carecen de esta proyección directa a las neuronas motoras vocales. Adaptación a partir de Pfenning *et al*., 2014. «Convergent transcriptional specializations in the brains of humans and song-learning birds». *Science* 346: (6215), 1256846: 1-10. Con la autorización de AAAS.

de una manera que se asemeja a la «afinación» de los bebés humanos, un proceso que podría ser modelizado del modo previsto por Coen. Berwick *et al*. (2011) ya han demostrado que la secuencia lineal restringida en el canto de los pájaros puede ser registrada a partir de un número manejable computacionalmente de ejemplos positivos. Si todo esto es correcto, podemos dejar a un lado este aspecto concreto del sistema del lenguaje para la exteriorización y centramos en el resto de aspectos centrales y específicos de los humanos.

Por último, y a modo de prueba neurológica que confirma nuestro enfoque del divide y vencerás, el grupo de investigación de David Poeppel ha obtenido recientemente resultados experimentales magnetoencefalográficos (MEG) sobre la actividad cortical dinámica, que indican que la construcción jerárquica de la estructura del lenguaje está disociada de la construcción lineal de la secuencia de palabras (Ding *et al*., 2015, en prensa). Hablaremos más sobre lenguaje y cerebro en el capítulo 4.

Volviendo a nuestra tercera motivación, nos ha parecido, por lo menos a nosotros, que los importantes puntos de vista de Lenneberg sobre la biología y la naturaleza de la evolución del lenguaje corrían el peligro de perderse. Por ejemplo, Lenneberg hizo un pormenorizado análisis de los pros y contras del enfoque de «continuidad» evolutiva, el adoptado por Darwin, comparándolo con el enfoque de «discontinuidad», el suyo propio. Esto era un tanto conmovedor teniendo en cuenta los recientes avances en el pensamiento evolutivo que han aclarado estas posiciones. Como cualquier campo científico rico, la biología evolutiva moderna ha avanzado desde la perspectiva original de Darwin sobre la evolución como cambio adaptativo resultado de la selección de individuos.

Sí, Darwin estaba equivocado en algunas cosas. Quizás lo más conocido sea lo que se encargó de corregir la llamada Síntesis Moderna, el maridaje que se dio a mediados del siglo xx

entre la evolución por selección natural y el mendelismo y la herencia particulada (genes), que puso remedio a la falta de un buen modelo hereditario en el trabajo de Darwin y finalmente desembocó en la era genómica moderna del análisis de la evolución. Darwin adoptó la (incorrecta) teoría de la herencia de su época, «la herencia combinada». Según esta teoría, si se cruzan flores rojas con flores blancas, todos los colores de las flores descendientes estarán en un punto intermedio: el rosa. La mezcla acaba rápidamente con la variación de la que se alimenta la selección natural –recordemos la experiencia infantil de pasar un pincel mojado arriba y abajo sobre una paleta de acuarelas–. El espectro de colores diferentes desde el encarnado hasta el amarillo se convierte en un marrón terroso. Resulta que si todos los descendientes tienen estas mismas características marrón terroso, la selección natural no tendrá nada que seleccionar. No hay nadie que esté por encima de la media, ni nadie que esté por debajo; todos son iguales en el tamiz de la selección natural. Sin variación y sin selección natural, la maquinaria darwiniana se paraliza al cabo de una o dos generaciones. Lo que se necesita es algo que permita conservar la variación de generación en generación, aunque los cruces de flores rojas y flores blancas a veces den flores rosas.

Fue Mendel quien dio con la respuesta: la herencia funciona mediante partículas específicas –los genes–, aunque, por supuesto, en aquel tiempo Mendel no tenía manera de saberlo. En la primera mitad del siglo xx, fueron los fundadores de la Síntesis Moderna –Sewall Wright, Ronald A. Fisher y J. B. S. Haldane– los encargados de mostrar cómo se combinaban las partículas hereditarias de Mendel con la evolución de Darwin mediante la selección natural de una manera sistemática, construyendo modelos matemáticos que demostraran explícitamente cómo operaba la máquina darwiniana de generación en generación para cambiar la frecuencia de rasgos poblacionales.

Pero Darwin también estaba muy equivocado en su suposición (generalmente tácita) de que las poblaciones biológicas son infinitas, así como en su suposición de que incluso en poblaciones efectivamente infinitas la evolución por selección natural es un proceso solo determinista. Cada pieza de la máquina de la evolución –eficacia, migración, fecundidad, apareamiento, desarrollo y otros– está sujeta a los golpes y flechas de la injusta fortuna biológica. Muy a menudo, la supervivencia del más fuerte se reduce a la supervivencia del más afortunado, lo cual afecta a si la evolución podría ser o no una continuidad sin sobresaltos tal como la previó Darwin. Para verlo hace falta un análisis matemático más sutil, y hasta donde podemos saber, ninguno de los libros recientes sobre evolución del lenguaje parecen haberlo comprendido en su totalidad. El propio Darwin dijo en su autobiografía: «Mi capacidad para seguir una secuencia de pensamiento larga y puramente abstracta es muy limitada; y por tanto, nunca habría tenido ningún éxito con la metafísica o con las matemáticas». (Darwin, 1887: 140).

En lo que queda de capítulo, desarrollaremos estas dos últimas motivaciones en orden inverso, primero abordaremos la teoría evolutiva y, luego, daremos un vistazo al enfoque del divide y vencerás junto con la evolución y la genómica. Dejaremos los detalles relativos al programa minimalista y la tesis minimalista fuerte para los capítulos 2 y 3.

Evolución de la teoría evolutiva

Para empezar, ¿cuál es la gran diferencia entre la teoría evolutiva contemporánea y las teorías sobre la evolución del lenguaje? Empecemos situándonos en el escenario histórico, alrededor de 1930, en el apogeo de la Síntesis Moderna, que hemos descrito anteriormente. Los escritores más actuales que se ocupan de

la evolución del lenguaje parece que valoran la historia de los problemas de Darwin con la herencia junto con su resolución mediante la Síntesis Moderna, e incluso hay quienes observan algunos de los efectos simples que el tamaño de una población finita puede tener en el cambio evolutivo; por ejemplo, que los efectos del muestreo en poblaciones pequeñas, lo que a veces se llama «deriva genética», podrían desembocar en la pérdida de rasgos ventajosos por mala suerte (su frecuencia es de 0 en la población) o a la fijación completa de rasgos no ventajosos por buena suerte (su frecuencia es de 1). No es difícil ver por qué. Podemos hacer lo mismo que Sewall Wright y Ronald Fisher: simulemos una población biológica como una colección finita de canicas de diferentes colores dentro de un frasco, e imaginemos que cada bolita es un individuo o una variante de gen –pongamos que un 80% son blancas y un 20%, rojas–. El tamaño de la población es fijo: ni la selección ni la mutación ni la migración, ni ninguna otra circunstancia, alteran las frecuencias de color de las canicas de ninguna otra manera. Ahora simulamos la generación de una pequeña población de un tamaño de 5. La generamos cogiendo una canica al azar de dentro del bote, anotando su color y, a continuación, volviendo a dejarla en el bote, y así hasta que hayamos seleccionado 5 canicas. Los colores de las 5 canicas seleccionadas constituyen la descripción de la nueva generación de «descendientes». La consideramos la primera generación. Luego repetimos el proceso, teniendo cuidado de que nuestra segunda ronda de selección aleatoria refleje cualquier cambio que se pueda haber producido en la frecuencia. Así, por ejemplo, podríamos concluir con 4 canicas blancas y 1 roja –esto se correspondería con la frecuencia de blanco a rojo con la que empezamos–. Pero también podría terminar con, supongamos, 3 canicas blancas y 2 rojas, un 60% blancas y un 40% rojas, en cuyo caso, para la segunda generación, tendríamos 2/5 probabilidades de seleccionar una canica roja. El juego continúa, eternamente.

Está bastante claro que existe una posibilidad real de no seleccionar ninguna canica roja, en cuyo caso el rojo se extinguiría; si no hay canicas rojas en el bote, estas no van a reaparecer por arte de magia (a menos que supongamos que las canicas blancas pueden «mutar» a rojas). Al principio, cada vez que sacamos una canica del bote, las rojas tienen de promedio 1/5 = 20% de probabilidad de ser seleccionadas, exactamente igual que cualquier otro «individuo» de la población. Por tanto, la probabilidad de que la canica roja *no* sea escogida en ninguna selección es, de promedio, uno menos esta probabilidad, o sea, 1 – 1/5 = 4/5. La probabilidad de que la canica roja no sea escogida tras dos selecciones es el producto de no seleccionarla dos veces, 4/5 x 4/5 o 16/25, y así sucesivamente. De promedio, la probabilidad de que en la primera generación no sea seleccionada la roja cinco veces es $(4/5)^5$ o aproximadamente 0,328. Así pues, casi una tercera parte del tiempo, la canica roja podría «perderse», y la frecuencia de canicas rojas caería de 20% a 0. Del mismo modo, si sacáramos una canica roja 5 veces seguidas, el 80% de frecuencia de las canicas blancas se reduciría a 0 –lo cual sucedería en un promedio de $(1/5)^5$ = 0,032% del tiempo en la primera generación, mucho menos probable que la posibilidad de perder la canica roja por completo–. De esta manera, la frecuencia de la mezcla de canicas blancas y rojas «derivaría» entre 0 y 1 de generación en generación en ninguna dirección en particular, de ahí el termino «deriva genética».

De hecho, no es difícil demostrar que en este sencillo escenario, y dada la deriva genética, cualquiera de los colores siempre va a acabar por extinguirse o fijarse. Para representarlo, nos ayudará pensar en la «deriva genética» utilizando otra imagen, el «deambular de un borracho». Un borracho sale dando tumbos de su bar favorito, dando pasos al azar solamente en una de dos direcciones: hacia delante o hacia atrás. Es un andar aleatorio en una dimensión. ¿Adónde irá el

borracho con el paso del tiempo? Intuitivamente, puesto que el borracho comienza a dar tumbos a un paso del bar, parece que siempre acabara volviendo al punto de partida. Pero la intuición de que el andar aleatorio siempre fluctúa en torno a su punto de partida es errónea. De hecho, el caminar aleatorio siempre va a algún lugar: la distancia esperada desde el punto de partida aumenta como la raíz cuadrada del tiempo, que es el número de pasos (Rice, 2004: 76). Si transformamos los pasos en frecuencias de rasgos o genes entre 0 y 1, entonces, de promedio, la mitad del tiempo el borracho llegará a 1 –en cuyo caso el rasgo o gen se habrá fijado en la población y se quedará en este punto–, y de promedio, la mitad del tiempo el borracho llegará a 0– en cuyo caso el rasgo se extinguirá y también se mantendrá en 0–. Los líderes de la Síntesis Moderna desarrollaron modelos estadísticos para demostrar y predecir estos efectos matemáticamente, por lo menos en parte.

Sin embargo, en la medida en que hemos sido capaces de determinarlo, a pesar de lo partidarios que son los escritores contemporáneos de la Síntesis Moderna, entre las últimas explicaciones de la evolución del lenguaje humano *ninguna* parece haber comprendido del todo el paso del darwinismo convencional a la versión plenamente estocástica moderna –en concreto, que hay efectos estocásticos no solo debidos al muestreo, como la deriva sin rumbo, sino también debidos a la variación estocástica *dirigida* en la eficacia, la migración y la heredabilidad de hecho, todas las «fuerzas» afectan a las frecuencias individuales o de los genes. La eficacia *no* es un «ácido algorítmico universal» todopoderoso como algunos pretenden que sea. La contingencia y el azar desempeñan un papel importante. El espacio de posibilidades es tan vasto que muchas, incluso la mayoría, de las «soluciones» son inalcanzables para la evolución por selección natural, a pesar de los millones de años de tiempo y los miles de millones de

organismos de los que dispone. Chatterjee *et al*. (2014) han llegado a resultados formales en este sentido recientemente, que demuestran que, en general, el tiempo necesario para la adaptación será exponencial en la longitud de la secuencia genómica, que es como decir que no hay tiempo suficiente, incluso dados los eones geológicos. (La «capacidad de procesamiento paralelo» que a veces se atribuye a la evolución por selección natural porque están en juego muchos organismos resulta ser una quimera).

Vamos a ilustrar un efecto estocástico con un ejemplo del mundo real. Steffanson y sus colegas (Steffanson *et al*., 2005) descubrieron una determinada interrupción de gran escala en el cromosoma humano 17.[5] Las mujeres islandesas con este cambio cromosómico tienen aproximadamente un 10% más de descendencia (0,0907) que las mujeres islandesas que no lo tienen. Llamaremos a estos dos grupos C + (con cambio cromosómico) y C (sin cambio). Según la terminología darwiniana habitual, decimos que las mujeres C + son un 10% «más eficaces» que las mujeres C, o que las mujeres C + tienen una ventaja selectiva de 0,10. En otras palabras, por cada niño nacido de una mujer C, una mujer C + tiene 1,1 hijos. (Usamos comillas enfáticas en «eficacia» justificadamente).[6]

Bien, por lo que sabemos acerca de la reproducción humana, no es difícil entender que, en la realidad, ninguna de las mujeres C + podría haber tenido exactamente 1,1 hijos más que una mujer C. Eso sería particularmente salomónico. En realidad, todas las mujeres que los investigadores tabularon (16.959) dieron a luz 0, 1, 2, 3, 4 o 5 o más hijos (2.657 mujeres tenían 5 o más). Así que, de promedio, las mujeres C + tenían un 10% más de hijos que las mujeres C –algunas de las mujeres C + «más eficaces» no tenían ningún hijo (de hecho, muchas, 764 de ellas)–. Y este es el quid de la cuestión: cualquier individuo en particular (o un gen) puede ser un 10% «más eficaz» que la población general, y sin embargo no dejar

ningún descendiente (o copias de genes) tras de sí. De hecho, en nuestro ejemplo, 764 mujeres «más eficaces» tenían, en realidad, «una eficacia cero». Por tanto, la eficacia es –ha de ser– una variable aleatoria –tiene un promedio y algunas variaciones sobre dicho promedio, es decir, una distribución de probabilidad–. Así pues, la eficacia en sí es estocástica –como la deriva genética (y la migración, la mutación y similares)–. Pero a diferencia de la deriva genética, la eficacia o ventaja selectiva tiene una dirección definida, no vagabundea por ahí como el borracho.

Todo esto puede afectar a los resultados evolutivos, resultados que, por lo que sabemos, no aparecen en los libros recientes sobre evolución del lenguaje, pero que aparecerían de inmediato en el caso de cualquier innovación de orden genético o individual, precisamente el tipo de escenario del que probablemente se trate al hablar de la aparición del lenguaje, cuando la norma debían de ser los grupos pequeños y las pequeñas poblaciones reproductoras. Por supuesto, tanto si los modelos están suficientemente bien especificados para reflejar este nivel de detalle como si no lo están.

Además, se podría responder que la eficacia y la evolución darwiniana tienen que ver con promedios de la *población*, no con individuos; lo que importa y lo que cambia durante la evolución son las frecuencias de eficacia frente a menos eficacia, no lo que le sucede a una mujer en particular. Eso es correcto en la medida en que lo es, pero no vale cuando el número de individuos o copias de genes es muy pequeño, y resulta que esta es precisamente la situación de interés cuando se considera la aparición de cualquier rasgo genuino nuevo.

¿Cómo es eso? Si tomamos una distribución de probabilidad de uso general como modelo para situaciones iguales a esta, resulta que un *solo* individuo (o gen) con una ventaja de eficacia del 10% tiene una probabilidad (sorprendentemente grande) de perderse al cabo de una sola generación de más de

un tercio, aproximadamente 0,33287.[7] Y esto sucede con una ventaja de eficacia enorme, quizás 1 o 2 órdenes de magnitud mayores de lo que suele medirse en este campo. Además, si un solo individuo o gen no tiene *ninguna* ventaja selectiva –es neutro, o sea, tiene una eficacia 1–, entonces, como sería de esperar, su probabilidad de perderse en una generación aumentaría en comparación con su pariente mucho más eficaz. Sin embargo, el aumento es leve: la probabilidad de pérdida total se eleva a alrededor de 0,367 de 0,33, solo el 2-3%. Así que contrariamente a lo que se podría pensar de entrada –y contrariamente a todo lo que se describe en el libro de la-evolución-del-lenguaje-, esto *no* es como el caso de la deriva genética, en la que cuanto menor es la población, mayor es la probabilidad de perder o ganar. El tamaño de la población no tiene ningún papel en la probabilidad de extinción-*versus*-supervivencia a través de una generación cuando hablamos de un pequeño número de copias de individuos o genes.

¿Por qué es importante este resultado? Siempre que aparece una nueva variante génica o un individuo con una nueva variante, en general este se encontrará solo en el mundo, o tal vez como máximo se encuentre con cuatro o cinco copias (si el nuevo rasgo apareció en toda la descendencia de un individuo determinado a causa de una mutación). El tamaño de la población no determinará la trayectoria inicial de esta innovación; una vez más, al contrario de lo que solemos encontrar en la literatura contemporánea sobre la evolución del lenguaje. Gillespie (2004: 92) lo expresa así: «Consideramos que [el tamaño de la población] es irrelevante respecto al número de descendientes producidos por el [gen] solitario. […] Cuando el [gen] se vuelve más común y ya no nos interesa el número de copias sino su *frecuencia*, diremos mejor que su dinámica estocástica estará determinada por la deriva genética» [las cursivas son nuestras]. En pocas palabras, cuando aparecen por primera vez nuevas variantes génicas,

los individuos con esas características primero tendrán que ascender por un «pozo con gravedad estocástica» en el que no manda la selección natural.

Una vez que el número de dichos individuos (o copias de genes) alcanza un punto de inflexión determinado en función de la eficacia, la selección natural toma el control de los mandos y un 10% de los individuos más eficaces suben a la conocida montaña rusa darwiniana hasta la cima, éxito total final, y fijación en frecuencia 1 en la población. (¿Por qué las mujeres más eficaces C+ islandesas no tomaron el mando de todo el país, o por lo menos de los bancos de Islandia?)

¿Y cuál es precisamente ese punto de inflexión? Si un rasgo nuevo o variante de gen tiene una ventaja selectiva de 10% para estar seguro al 99% de que el «novato» no se va a extinguir; entonces se va a fijar en la frecuencia 1 en lugar de 0. Esto da aproximadamente 461 individuos. Es importante ver que este punto de inflexión también es independiente del tamaño de la población. Gillespie (2004: 95) lo deja bien claro: «En las primeras generaciones, lo único que importa es el número aleatorio de descendientes. […] No hay espacio para *N* [el tamaño de la población] cuando se modeliza el destino de estos individuos».

En resumen, para ser un teórico de la evolución completamente moderno, lo que en realidad hay que hacer es pasar de «a vista de gen» a «a vista de apostador» (invitamos a los lectores interesados en indagar sobre este tema con mayor profundidad a consultar Rice, 2004, capítulos 8 y 9, o Rice, Papadapoulos y Harting, 2011). ¿Cuándo tocamos fondo? Tenemos que inyectar biología del mundo real y comportamiento estocástico en el cuadro evolutivo. Ello incluye tasas estocásticas de migración (Ellis Island ayer y hoy); patrones de herencia estocásticos (después de todo no me parezco a mi abuelo); interacciones entre genes (no un solo «gen del lenguaje»); y eficacia fluctuando cada vez que se eleva la

frecuencia (¿exceso de población?). Si lo hacemos así, el simplista punto de vista, según el cual la evolución adaptativa escala inexorablemente picos de eficacia, se desmorona. Es difícil «satisfacer» simultáneamente los efectos de mil y un genes que interactúan, por no hablar de sintonizarlos a todos juntos para lograr la eficacia óptima.

Hay quien ha afirmado que estas dificultades que presenta la selección natural se pueden superar mediante el uso de la teoría de juegos aplicada a un contexto evolutivo, que se llama «estrategias evolutivas estables» (Maynard-Smith, 1982), y, además, esto ha «resuelto» decisivamente el problema asociado con la maximización de la eficacia multidimensional (Fitch, 2010: 54). Esto no es del todo correcto. No ha habido tal resolución o, por lo menos, todavía no. La teoría de juegos *ocupa* un lugar muy importante en el pensamiento evolutivo moderno, ya que está diseñada para considerar lo que un individuo debe hacer dadas las acciones o estrategias de otros individuos. Como resultado, es particularmente útil en el caso de la selección dependiente de la frecuencia, en la que los cambios de la eficacia dependen de cómo utilizan muchas otras personas la misma estrategia –por ejemplo, la decisión de tener descendencia antes, y no más tarde, en la vida–. Dichos escenarios dependientes de la frecuencia multidimensional suelen ser extremadamente difíciles de analizar de otras formas. De hecho, nos parece que los efectos dependientes de la frecuencia podrían ser exactamente lo que cabría esperar en el caso de la evolución del lenguaje humano, con una interacción dinámica entre los individuos con/sin lenguaje. Necesitamos a Nowak (2006) y sus modelos evolutivos dinámicos para el lenguaje.

No hemos seguido aquí la línea de razonamiento de dependencia-frecuencia/teoría de juegos porque no estamos seguros de que se cumplan otros supuestos necesarios. El análisis evolutivo mediante la teoría de los juegos no es la

panacea que a veces parece que sea, a pesar de su presencia generalizada en las conferencias de Evolang. El análisis mediante la teoría de juegos funciona mejor cuando se trata de tamaños de población muy grandes, en equilibrio, sin mutaciones, y cuando no hay recombinación sexual. O sea, precisamente, cuando no tenemos que preocuparnos por los efectos estocásticos, o cuando queremos saber cómo fueron los primeros movimientos de las poblaciones hacia el equilibrio; y precisamente en contra de algunos supuestos generalmente aceptados de que el tamaño poblacional efectivo en ese momento era pequeño y no estaba en equilibrio. Por último, el enfoque de la teoría de juegos a menudo se ha divorciado de los conocimientos que hemos adquirido gracias al estudio de la genética poblacional y la evolución molecular, y esto resulta que es una parte importante de lo que hemos aprendido acerca de la evolución en la era genómica moderna, y gracias al enorme volumen de nuevos datos que se han recogido y que se recogerán. Sin duda, recientemente ha habido avances sustanciales en el maridaje entre los clásicos modelos genéticos poblaciones de la Síntesis Moderna y el análisis mediante la teoría de juegos, cuyos responsables son los investigadores como Martin Nowak, entre otros (Humplik, Hill y Nowak, 2014; McNamara, 2013). La teoría de juegos sigue siendo una parte esencial de la caja de herramientas de los teóricos de la evolución actuales, pero tiene sus limitaciones, y estas todavía están por resolverse del todo en el contexto del resto de la evolución molecular. (Una discusión más profunda sobre este tema, véase en Rice, 2004, cap. 9; y en Rice, Papadapoulos y Harting, 2011). En resumen, el Eclesiastés 09:11 tenía toda la razón: «No es de los ligeros la carrera, ni de los valientes la batalla; y tampoco de los sabios es el pan, ni de los entendidos las riquezas, ni de los hábiles el favor, sino que el tiempo y la suerte les llegan a todos».

Si esta conclusión está bien encaminada, quiere decir que debemos tomar en cuenta estos efectos estocásticos al considerar la evolución del lenguaje. En efecto, este elemento de probabilidad parece estar implicado siempre que nos encontramos con la aparición de rasgos auténticamente nuevos, como el ojo, tal como Gehring (2011) argumenta, e incluso tal como admitió –un poco a regañadientes– Darwin. Retomaremos este punto sobre el ojo en seguida. En general, debemos entender que, como ha dicho el teórico de la evolución H. Allen Orr, «adaptación no es selección natural» (Orr, 2005a: 119), por tanto, debemos ponernos en guardia cada vez que nos encontramos con que estas dos nociones distintas casualmente andan juntas.

El paso del darwinismo determinista a su versión totalmente estocástica es el resultado de la adopción de un punto de vista matemático y biológico más sofisticado para entender la evolución, así como de procesos estocásticos desarrollados a partir de la publicación de *El origen* de Darwin en 1859. Tal avance es lo que se espera en cualquier campo científico próspero –la propia evolución de la teoría evolutiva–, pero parece como si muchos autores no dudaran de la visión original de Darwin sobre la evolución, como solo selección adaptativa en los individuos. Gracias a la investigación tanto teórica como empírica, sabemos ya desde hace algún tiempo que los puntos de vista de Darwin y de la Síntesis Moderna no siempre eran exactos, y existen amplias evidencias que lo apoyan (Kimura, 1983; Orr, 1998, 2005a; Grant y Grant, 2014; Thompson, 2013). Todo ello sin que sea necesario rechazar el darwinismo al cien por cien; invocar la transmisión viral, el flujo de genes horizontal a gran escala, o macromutaciones milagrosas; o incluso incorporar puntos de vista legítimos del campo de la evolución y el desarrollo, o «evo-devo».

Entonces, ¿cómo evolucionan los organismos? ¿La evolución se produce lentamente [*evolution by creeps*] o a golpes

bruscos [*evolution by jerks*], como lo expresaron Stephen J. Gould y sus críticos en su famoso intercambio? (Tumer, 1984; Gould y Rose, 2007). Por ambos, por supuesto. A veces, el cambio evolutivo adaptativo es, de hecho, muy lento y laborioso, y se produce a lo largo de millones de años de acuerdo con la visión clásica de Darwin. Pero, a veces, el cambio evolutivo, incluso cambios de comportamiento a gran escala, como las preferencias alimentarias de las mariposas pepenes (Thompson, 2013: 65), puede ser relativamente rápido, impresionantemente rápido. Esta velocidad se ha confirmado en cientos de especies diferentes en cada uno de los principales grupos filogenéticos, como se ha señalado hace poco en el magistral estudio de Thompson (2013).

Aquí no hay que enredar las cosas admitiendo solo, como hacen algunos, que el gradualismo infinitesimal darwinista a veces acelera su ritmo. Estamos de acuerdo. Pero la cuestión crucial es cuál es el ritmo con respecto a las innovaciones evolutivas que tenemos a mano. En nuestra opinión, abarca tanto las posibilidades a largo plazo –millones de años y cientos de miles de generaciones, como sucede en la aparente evolución de un conjunto de herramientas de aprendizaje vocal que nos antecede a las aves y a nosotros–, como las posibilidades a corto plazo –unos pocos miles de años y cientos o miles de generaciones, como en el caso de adaptaciones relativamente recientes, por ejemplo la capacidad de los tibetanos para desarrollarse a grandes altitudes donde hay menos oxígeno, o la capacidad para digerir la lactosa contenida en los productos lácteos agrícolas después de la infancia (Bersaglieri *et al*., 2004), o –nuestra profunda convicción– la capacidad innovadora de construir estructuras sintácticas jerárquicas.

Algunos de estos rasgos se saltaron el largo recorrido de lento cambio genético siguiendo el consejo de la bióloga Lynn Margulis: la manera más rápida de conseguir genes totalmente nuevos e innovadores es comiéndonoslos. Los tibetanos, evi-

dentemente, lograron un fragmento de ADN regulador que es parte de la reacción de nuestro cuerpo a la hipoxia por apareamiento con nuestros parientes, los denisovanos, por lo que engulleron genes mediante la introgresión (Huerta-Sánchez *et al*., 2014). Aparentemente, los seres humanos sacrificaron diversos e importantes rasgos adaptativos para sobrevivir en Europa a partir de los neandertales y los denisovanos, incluyendo cambios en la pigmentación de la piel, ajustes del sistema inmunitario y análogos (Vernot y Akey, 2014). Para estar seguros, una vez comidos los genes tuvieron que demostrar su valía selectiva, pero este tipo de introgresión genética puede sacarle a uno del pozo de la gravedad mencionado anteriormente.

Si hay alguna duda de que este tipo de contrabando más allá de las puertas de entrada darwinianas es importante, recordemos que fue Margulis quien defendió la teoría, desacreditada en otro tiempo pero ya confirmada, de que los organismos adquirieron los orgánulos llamados mitocondrias, que hoy dan energía a nuestras células, con solo una comida gratis, zampándose otra única célula mediante la fagocitosis (Margulis, 1970). Esta versión, tal vez algo más antigua del *Desayuno sobre la hierba* de Manet, puso en marcha una de las ocho «principales transiciones en las evoluciones» identificadas por los biólogos evolutivos John Maynard Smith y Eörs Szathmáry (1995). Maynard Smith y Szathmáry destacaron la importancia de que, de estas ocho transiciones, que van desde el origen del ADN a la sexualidad y el origen del lenguaje, seis, incluido el lenguaje, parece que han sido acontecimientos evolutivos únicos confinados a un solo linaje, con varias transiciones relativamente rápidas en el sentido que mencionábamos antes. Aquí no hay nada que transgreda el darwinismo más convencional.

Por tanto, sí puede haber cambios genómicos/fenotípicos bruscos, y lo que esto hace es «cambiar el punto de partida

desde el que actúa la selección», como dice el biólogo Nick Lane (2015: 3112). Aquí Lane comenta el notable cambio, aparentemente aislado y abrupto, de la vida celular simple, las procariotas –con ADN circular, sin núcleo, sin sexo y, esencialmente, sin muerte– hacia la gastronomía, que condujo a la vida compleja, las eucariotas, que nos incluyen a nosotros –con ADN lineal, mitocondrias, un núcleo, orgánulos complejos y, finalmente superando a Woody Allen, con sexo, amor, muerte y lenguaje. Tal como Lane subraya, «no hay que confundir saltación genética con adaptación» (2015: 3113). Desde la perspectiva del tiempo geológico, estos cambios fueron rápidos.

Todo esto pone de relieve el papel del azar, de la contingencia y del contexto bioquímico-físico en el cambio evolutivo innovador; la evolución por selección natural funciona a ciegas, sin tener en mente «metas» en cuanto a inteligencia superior o lenguaje. Algunos acontecimientos ocurren una sola vez y no parece que sean fácilmente reproducibles –el origen de las células con núcleo y mitocondrias, y sexo, y más cosas–. Otros biólogos evolutivos coinciden con ello. Ernst Mayr, en un famoso debate con Carl Sagan, señaló que nuestra inteligencia en sí, y por implicación del lenguaje, probablemente entra también en la misma categoría:

> Nada demuestra mejor la improbabilidad del origen de una alta inteligencia que los millones de […] linajes que no lograron alcanzarla. Desde el origen de la vida han existido miles de millones de especies, quizás tantos como cincuenta mil millones. Solo una entre todas ellas logró el tipo de inteligencia necesaria para fundar una civilización. […] Solo se me ocurren dos posibles razones que expliquen esta rareza. Una de ellas es que, en contra de lo que cabría esperar, la selección natural no favorece en absoluto la alta inteligencia. De hecho, todos los demás tipos de organismos vivos, millones de especies, se las arreglan la mar de

> bien sin una gran inteligencia. La otra razón posible de la rareza de la inteligencia es que es extraordinariamente difícil de adquirir […] lo cual no es tan sorprendente, dado que los requerimientos energéticos del cerebro son sumamente altos. […] El cerebro grande, que permite una gran inteligencia, se desarrolló en menos del último seis por ciento de la vida en la línea homínida. Parece ser que para que se produzca una gran inteligencia hace falta una compleja combinación de circunstancias raras y favorables. (Mayr, 1995).

Por supuesto, teniendo en cuenta los resultados de Chatterjee *et al*. (2014), ahora entendemos con un poco más de precisión el sentido en el que un rasgo puede ser «extraordinariamente difícil de adquirir»: es posible que sea computacionalmente intratable de alcanzar por selección natural.

Pongamos otro ejemplo de cambio evolutivo rápido, un cambio que puede que parezca más concreto y seguro, porque es muy reciente y se ha estudiado muy a fondo. Una de las observaciones experimentales más exhaustivas y de largo recorrido sobre selección natural en este campo es el estudio de cuarenta años de duración llevado a cabo por P. R. Grant y B. R. Grant, que consiste en el seguimiento evolutivo de dos especies de los pinzones de Darwin en la isla Daphne Mayor de las Galápagos, *Geospiza fortis* y *G. scandens* (Grant y Grant, 2014). Es el análisis evolutivo que más toca con los pies en el suelo. ¿Qué descubrieron los Grant? El cambio evolutivo a veces se correlacionaba con diferencias de eficacia, pero igualmente a veces no. En consecuencia, las diferencias en eficacia no predecían los resultados evolutivos. La selección variaba de episódica a gradual. Los acontecimientos singulares, como la aparición de una nueva especie de pinzón llamada *big bird* en la isla Daphne, llevaron a la hibridación con especies de pinzón existentes y a rachas de cambios evolutivos impulsadas por acontecimientos ambientales externos. Todas

estas observaciones de campo son testigos de lo que se puede esperar realmente en relación a la evolución del lenguaje humano. Como hemos dicho anteriormente, la hibridación intergrupal de denisovanos y neandertales desempeñó un papel en la evolución adaptativa humana. Aunque no pretendemos sugerir que el lenguaje surgió de esta manera –de hecho, hasta el momento esto parece estar específicamente descartado si atendemos a la evidencia de la introgresión genómica–, sí queremos dejar bien claro al lector que la evolución puede atraer a la liebre tanto como la tortuga.

Entonces, ¿por qué se supone sin plantear preguntas que la evolución darwiniana por selección natural es extremadamente gradual y lenta? Durante su viaje en el *Beagle*, Darwin se embebió de la influyente obra de Lyell *Principios de geología* (Lyell, 1830-1833), de tres volúmenes, y de la importancia que en ella se daba al «uniformismo» –fuerzas en el presente como las del pasado, montañas convertidas en arena tras millones de años de lenta erosión–. Lo mismo ocurre con muchos de los teóricos del origen del lenguaje. Armados con Darwin y Lyell bajo el brazo, suscriben una firme suposición de continuidad: como el ojo y cualquier otro rasgo, el lenguaje también *tiene que* haber evolucionado a base de «modificaciones numerosas, sucesivas y leves» (Darwin, 1959: 189). ¿Pero es estrictamente así? Fijémonos en «sucesivas». En una primera lectura, todo lo que «sucesivas» significa es que los acontecimientos evolutivos deben sucederse uno después de otro en el tiempo. Esto es siempre verdad, así que esta limitación la podemos dar por segura.

Nos quedan «numerosas» y «leves». Inmediatamente después de la publicación de *El origen*, Huxley, «el bulldog de Darwin», se mostró abiertamente crítico con ambas, y el 23 de noviembre de 1859 escribió a Darwin: «Ha cargado usted con una dificultad innecesaria al suscribir *Natura non facit saltum* tan sin reservas» (Huxley, 1859). El propio Darwin

solo pudo empujar su historia evolutiva gradual del ojo hasta *El origen*, seguro solamente de que la selección natural comenzaría a actuar después de que un fotorreceptor y una célula pigmentaria hubieran evolucionado para formar un prototipo de ojo parcialmente funcional en la detección de luz. No tenía ninguna explicación para la pareja célula pigmentaria-fotorreceptor, y tampoco hubiéramos esperado que la tuviera.

Aquí, la biología molecular moderna nos ofrece nuevos conocimientos. El prototipo de ojo de Darwin consistía en dos partes: una célula sensible a la luz (un «nervio»), y una célula pigmentaria para dar sombra a la célula fotorreceptora. «En los articulados podemos iniciar una serie con un nervio óptico simplemente envuelto por pigmento» (Darwin, 1859: 187). Pero Darwin no pudo encontrar una manera de retroceder con su razonamiento más allá de este punto. Al final, Darwin recurrió aquí a la misma opción que para el origen de la vida: la relegación al reino de los efectos del azar, más allá del ámbito explicativo de su teoría: «Cómo es que un nervio llega a ser sensible a la luz apenas nos interesa más que cómo la vida misma se originó, pero puedo decir que varios hechos me hacen sospechar que cualquier nervio sensible puede volverse sensible a luz» (Darwin, 1859: 187).

Según se reflexiona, emerge el mismo dilema darwiniano cada vez que se da una novedad auténtica. En el caso del origen del ojo, Gehring (2011) nos ha ofrecido un análisis más sutil. El ojo es el producto del azar y de la necesidad por igual, tal como Monod anticipó (1970). Hacen falta dos componentes para el prototipo de ojo, una célula fotorreceptora y una célula pigmentaria. La formación inicial de la célula fotorreceptora fue un acontecimiento fortuito; no se produjo a través de una laboriosa búsqueda a base de ensayo y error incremental a través de la selección: la captura de moléculas pigmentarias sensibles a la luz por células, posteriormente reguladas por el gen Pax-6. Lo que vería un observador desde fuera es un

larguísimo período de tiempo geológico, durante el que la vida no tenía pigmento celular fotorreceptivo, y después la aparición relativamente rápida de células-más-pigmento –el pigmento o fue capturado o no lo fue–. Todo esto ocurrió sin la necesidad de «numerosas» y «leves modificaciones». Sin duda, la molécula tuvo que pasar por el tamiz de la selección y, desde entonces, se ha ido retocando, pero después del acontecimiento crucial. Del mismo modo, la célula pigmentaria prototípica surgió de la ubicua melanina pigmentaria hallada en una sola célula junto con el pigmento fotorreceptor ya capturado. En algún momento, esta única célula se dividió en dos, de nuevo un acontecimiento estocástico, aparentemente bajo el control de un gen regulador diferenciador de células. También en este caso, si se mirara «desde fuera», lo que veríamos sería un período relativamente largo de estasis, seguido de una escisión de tipo «todo o nada» en dos células –las hijas se produjeron o no se produjeron–. «A partir de estas consideraciones, llegamos a la conclusión de que el prototipo de ojo darwiniano surgió de una sola célula por diferenciación celular, en la que el Pax-6 tiene el control de la célula fotorreceptora y el *Mitf*, el de la célula pigmentaria» (Gehring, 2011: 1058).

En pocas palabras, el origen primero del prototipo de ojo de dos células de Darwin no parece haber seguido la clásica fórmula selectiva de ensayo y error. Más bien, lo que sucedió fueron dos acontecimientos distintos, estocásticos y abruptos, responsables de esta innovación clave, el «film de la cámara» del ojo. ¿Y qué ha pasado desde entonces? A pesar de que ha habido muchas mejoras e innovaciones sorprendentes con relación al ojo, al cuerpo de su cámara, a los objetivos y a otras cosas, y tal y como Darwin lo escribió, al film se le han hecho muchos menos retoques. No es como si la evolución dejara atrás a Kodak, luego cambiara a Polaroid, y finalmente se alojara en la grabación digital. Las dos innovaciones iniciales

clave ni fueron numerosas ni fueron leves.[8] En una línea del tiempo, destacan, como gallinas en corral ajeno, dos cambios abruptos, grandes y rápidos en medio de un período de calma casi absoluta; un patrón de estasis e innovación igual que el de nuestro propio linaje, como veremos enseguida.[9]

No obstante, un «fundamentalista darwinista» aún podría insistir en una cadena ancestral que requiriese una continuidad gradual en todas las etapas, y así una fuerte probabilidad de encontrar especies contemporáneas que comparten uno u otro de los rasgos que componen el lenguaje humano. En este marco, incluso el reciente descubrimiento de que los chimpancés son capaces de cocinar alimentos (Wameken y Rosati, 2015), literalmente añade combustible al fuego de que nuestros parientes vivos más cercanos también están próximos a nosotros en términos de lenguaje. Sin embargo, como ya hemos visto en este capítulo en relación a las afirmaciones de Bomkessel-Schlesewsky *et al*. y de Frank *et al*., y como volveremos a ver en el capítulo 4, la realidad es que los chimpancés, lingüísticamente, son bastante diferentes de nosotros.

Tal vez esta imagen fundamentalista y uniformista podría calificarse de «visión micromutacional». La alternativa a menudo sostenida frente a esta imagen convencional –generalmente caricaturizada como hombre de paja– ha sido con más frecuencia su polo opuesto, la hipótesis del supuesto (e infame) «monstruo prometedor» propuesta por Goldschmidt (1940). Goldschmidt postuló cambios genómicos y morfológicos gigantes –incluso la aparición de una nueva especie– al cabo de una sola generación. Dado que los «monstruos prometedores» realmente parece que son imposibles, muchos descartan la posibilidad de cualquier otro tipo de cambios que no seas micromutaciones.

Sin embargo, esta es una falsa dicotomía. Como ya hemos visto, hay buenas razones para creer que es, lisa y llanamente, empíricamente falsa. Muchas innovaciones evolutivas –tales

como los núcleos celulares, el ADN lineal, y, creemos, haciéndonos eco de Lane (2015), el lenguaje– no encajan bien con las medidas de la procrusteana cama de lo micro *versus* monstruo prometedor.

Desde un punto de vista teórico, la opción micromutacional se congela en el tiempo más o menos hacia el año 1930, cercana ya la culminación de la Síntesis Moderna. En 1930, uno de los tres líderes de la Síntesis Moderna, R. A. Fisher, publicó su *Genetical Theory of Natural Selection*, con un modelo de adaptación matemático geométrico simple, estableciendo una comparación con el enfoque de un microscopio (Fisher, 1930: 40-41). La intuición es que si uno se acerca a una imagen enfocada con mucha precisión, solo cambios muy muy pequeños nos van a proporcionar un mejor enfoque. Un gran cambio en el enfoque seguramente nos alejará de la imagen deseada. Este único pasaje, intuitivamente plausible y convincente, bastó para convencer por completo a las siguientes generaciones de biólogos evolutivos, es decir, hasta hace poco.

Fisher utilizó los resultados de su modelo para argumentar que todo cambio evolutivo adaptativo es micromutacional –consistente en pequeños cambios infinitesimalmente cuyos efectos fenotípicos se aproximan a cero–. Como dice Orr (1998: 936): «Este hecho garantiza esencialmente que la selección natural actúa como *la única fuente de creatividad en la evolución*. […] Debido a que la selección modela la adaptación a partir de un suministro de variaciones continuas, casi fluidas, la mutación por sí sola proporciona poca o ninguna forma fenotípica» [las cursivas son nuestras].

En particular, el modelo de Fisher sugiere mutaciones con un efecto fenotípico extremadamente pequeño que tienen el 50% de probabilidades de sobrevivir, mientras que las grandes mutaciones tienen una probabilidad de supervivencia exponencialmente decreciente. Así pues, si adoptamos el modelo

de Fisher, entonces, por definición, los genes con un gran efecto fenotípico no pueden desempeñar papel alguno en la adaptación. Como indica Orr (1998: 936):

> Sería difícil exagerar la importancia histórica del modelo de Fisher. Su análisis, por sí solo, convenció a la mayoría de los evolucionistas de que los factores de gran efecto fenotípico tienen poco o ningún papel en la adaptación (revisado en Turner, 1985; Orr y Coyne, 1992). En efecto, un examen de la literatura revela que prácticamente todas las figuras principales de la Síntesis Moderna citaron la autoridad del modelo de Fisher como el único respaldo del micromutacionismo (véase Orr y Coyne, 1992; véase también Dobzhansky, 1937; Huxley, 1963; Mayr, 1963; Muller, 1940; Wright, 1948). J.B.S. Haldane parece haber sido la única excepción.

Y así es, aparentemente todos los trabajos que consultamos sobre la evolución del lenguaje abrazan la posición de Fisher –y con ella, el consiguiente papel completamente dominante en la selección natural–. El comentario de Fitch (2010: 47) es representativo, siguiendo la metáfora del «enfoca-el-microscopio: «El argumento central en contra de un papel adaptativo para los grandes cambios cualitativos es que las macromutaciones que observamos en la naturaleza interrumpen la función adaptativa en lugar de mejorarla. Los organismos son sistemas muy afinados, y los individuos que nacen con grandes cambios aleatorios tienen escasas probabilidades de acabar siendo más eficaces para sobrevivir».

Tallerman (2014: 195), citando a McMahon y McMahon (2012), indica que tanto ella como los dos autores mencionados también adoptan el gradualismo de Fisher: «McMahon y McMahon (2012, uno lingüista y el otro genetista) señalan que "la evolución biológica es típicamente lenta y acumulativa, no radical y repentina", y por lo que respecta a "una macromuta-

ción causante de un cambio inmediato y radical" especifican que "este último es evolutivamente muy improbable"».

Pero Fisher estaba equivocado. El trabajo experimental en la década de 1980 sobre genética adaptativa demostró que los genes individuales podían tener efectos sorprendentemente grandes en los fenotipos. De nuevo merece la pena citar a Orr íntegramente:

> En la década de 1980 […] se desarrollaron enfoques que finalmente permitieron recoger datos rigurosos sobre la genética de la adaptación: análisis de locus de carácter cuantitativo (QTL). […] En el análisis QTL, la base genética de las diferencias fenotípicas entre poblaciones o especies puede ser analizada utilizando un gran conjunto de marcadores moleculares mapeados. En los trabajos evolutivos microbianos, los microbios se introducen en un nuevo medio y se permite su adaptación a dicho medio; las herramientas genéticas y moleculares, a continuación, permiten la identificación de algunos o de todos los cambios genéticos subyacentes a esta adaptación. Los resultados de ambas aproximaciones fueron sorprendentes: la evolución a menudo implicó cambios genéticos relativamente de un gran efecto y, al menos en algunos casos, el número total de cambios parecía ser modesto […] [los resultados incluían] varios estudios clásicos, incluidos los que analizan la evolución de los escudos corporales reducidos o la estructura pélvica de los peces espinosos lacustres, la pérdida de larvas de tricoma («pelos» finos) en la especie *Drosophila*, y la evolución de nuevas morfologías en el maíz y en la especie *Mimulus* o flor mono. Estudios microbianos revelaron además que los cambios genéticos que ocurren temprano en la adaptación suelen tener mayores efectos en la eficacia que los que se producen más tardíamente, y que la evolución adaptativa paralela es sorprendentemente común (Orr, 2005a: 120).

De hecho, antes de Orr, Kimura (1983) observó un fallo fundamental en el modelo de Fisher que se deriva de la naturaleza estocástica de la evolución biológica real que hemos comentado anteriormente: Fisher no tuvo en cuenta correctamente la probabilidad de la pérdida estocástica de mutaciones ventajosas. Kimura observó que los cambios con mayores efectos fenotípicos tienen menos probabilidades de perderse. En el modelo de Kimura, las mutaciones de tamaño intermedio han de ser más probables en la adaptación. Sin embargo, este modelo también ha necesitado alguna modificación para reflejar la *serie* de pasos en todo «camino adaptativo», en lugar de un paso único (Orr, 1998). Como indica Orr (2005a: 122): «La adaptación según el modelo de Fisher, por tanto, implica unas pocas mutaciones con efecto fenotípico relativamente grande y muchas con efecto relativamente pequeño. […] La adaptación, pues, se caracteriza por un patrón de retornos decrecientes; las mutaciones de grandes efectos son normalmente sustituidas en una etapa temprana y las de efectos pequeños, más tarde». Nos podemos imaginar este cambio evolutivo como una pelota dando botes, el bote más grande es el primero y va seguido de botes sucesivos cada vez más pequeños –una secuencia de retornos decrecientes–. Este hallazgo tiene implicaciones evidentes para cualquier escenario de evolución del lenguaje que insista en el cambio micromutacional como primer paso. En pocas palabras, en lugar de que el cambio macromutacional sea raro e inesperado, lo contrario podría ser el primer paso, y, a veces, sucede así. Tanto la teoría evolutiva contemporánea como los experimentos en laboratorio y el trabajo de campo respaldan esta posición, sin necesidad de postular «mostruos prometedores» goldschmidtianos. En realidad existe un término medio seguro. En efecto, lo que realmente haya sucedido en una situación determinada es una cuestión empírica; como siempre, la biología se parece más a la jurisprudencia que

a la física newtoniana. Las pistas que tenemos, de las que hablaremos a continuación y más adelante en el capítulo 4, apuntan en la dirección de un cambio relativamente rápido, en algún momento entre el período en el que aparecieron por primera vez los seres humanos anatómicamente modernos en África, hace unos 200.000 años, y el posterior éxodo que los llevó fuera de África, hace 60.000 años.

¿Cuál es la lección que debemos aprender de esta visión moderna sobre el darwinismo y el cambio evolutivo? Básicamente, obtenemos aquello por lo que hemos pagado, y si hemos pagado por ello, es importante entender lo que hemos comprado –el paquete entero con todas sus consecuencias–. Si optamos por el modelo de Fisher, necesariamente deberemos abrazar el micromutacionismo, y ya lo hemos descartado todo por decreto, excepto la selección natural, como impulso causativo de la evolución del lenguaje. Como hemos visto, también nos perdemos el poder explicar el origen de las células complejas a partir de las células simples procariotas, el origen de los ojos, y muchas cosas más. Por otro lado, si no nos va el modelo de Fisher y nos pasamos a una visión más moderna, entonces dejamos la puerta abierta a una serie más rica de posibilidades.

Volviendo ahora a la historia humana, un examen del registro paleoarqueológico de nuestro linaje *Homo* respalda la imagen no gradualista, no la gradualista: un patrón recurrente de «desconexiones entre momentos de aparición (y desaparición) de nuevas tecnologías y nuevas especies» (Tattersall, 2008: 108). El punto básico es fácil de ver. De acuerdo con Tattersall, cada vez que ha aparecido una especie de *Homo* nueva y morfológicamente diferente, no ha habido ninguna innovación cultural o tecnológica simultánea. Por el contrario, las innovaciones tecnológicas/culturales aparecen *mucho tiempo después* de la aparición de cada nueva especie de Homo –con ese tiempo medido en cientos de miles de años–.

Dicho en otras palabras, como constata Tattersall (2008: 103): «Las innovaciones tecnológicas no están asociadas a la emergencia de nuevos tipos de homínidos». Por ejemplo, el modo 1 o herramientas oldovaynenses se fechan por primera vez en hace unos 2,5 millones de años antes del presente (AP). Recientemente, se han encontrado herramientas aún más antiguas, fechadas hace 3,3 millones de años (AP), en Lomekwi, en Kenia (Harmand *et al*., 2015). Estos tipos de herramientas arcaicas se mantuvieron durante quizás un millón de años, hasta la innovación del modo 2, las hachas de mano achelenses. Sin embargo, como señala Tattersall (2008: 104), esta innovación tecnológica «retrasa significativamente la fecha de la llegada a la Tierra de una nueva especie de homínido, que suele conocerse hoy en día como *Homo ergaster*», En una revisión reciente, Svante Pääbo, el científico más importante para la recuperación de ADN antiguo y la secuenciación de los genomas neandertales y denisovanos, se hace eco de este sentimiento: «Hace solo unos 2,6 millones de años que los ancestros humanos empezaron a hacer herramientas de piedra que pueden ser reconocidas como tales cuando las encuentran los arqueólogos. Pero incluso entonces, las diferentes herramientas producidas no cambiaron mucho durante cientos de miles de años» (Pääbo, 2014: 216).

Del mismo modo, aunque el tamaño del cerebro aumentó durante el linaje del *Homo*, y la capacidad craneal del neandertal llegó a ser de media más grande que la de los humanos modernos, el registro del comportamiento y el material se retrasa. No es hasta la aparición de los primeros humanos modernos en África cuando vemos el comienzo de cambios rápidos, tanto en las herramientas como en la aparición de los primeros artefactos simbólicos inequívocos, como adornos de concha, uso de pigmentos y, sobre todo, los grabados geométricos hallados en la cueva de Blombos, de hace aproximadamente 80.000 años (Henshilwood *et al*., 2002). Aquí Pääbo

también está de acuerdo: dice que algo tuvo que separamos de los neandertales, algo que provocó la persistente propagación de nuestra especie, que nunca había cruzado las aguas abiertas hacia el norte y más allá de África y, luego, por todo el planeta en solo unas pocas decenas de miles de años. ¿Qué fue eso?

Junto con Tattersall, Pääbo destaca la falta de arte figurativo y otros ornamentos de comportamiento simbólico moderno en los neandertales. Esto nos da una pista sólida (Pääbo, 2014b). Evidentemente, nuestros antepasados que se desplazaron fuera de África ya tenían «eso» y el «eso», sospechamos, junto con Tattersall, era el lenguaje. Aquí Pääbo pone reparos. Según él sugiere, lo que nos diferencia es «nuestra propensión a la atención compartida y la capacidad de aprender cosas complejas a partir de otros», considerando aquí el lenguaje como un aspecto del aprendizaje cultural, de acuerdo con la opinión de su colega Michael Tomasello (Pääbo, 2014b: 3757-3758). Nos parece que se equivoca con relación al lenguaje y la forma en que se adquiere. Pääbo parece haber vuelto a la visión antropológica «boasiana» del siglo pasado, como describimos en el capítulo siguiente.

Sea como fuere, el resultado del éxodo de nuestros antepasados al salir de África fue que una determinada especie de *Homo* –nosotros– con el tiempo iba a dominar el mundo, a absorber todo lo bueno de los genomas de los neandertales y denisovanos, y dejar atrás el resto. Acaso esta sea una imagen de fantasía, pero, pese a todo, una imagen harto conocida e inquietante, dado lo que sabemos acerca de la posterior historia de nuestra especie.

Lo que no vemos es nada que se parezca al «gradualismo» en las nuevas tecnologías de las herramientas o en innovaciones como el fuego, el cobijo o el arte figurativo. Aunque el uso controlado del fuego aparece aproximadamente hace un millón de años, es ni más ni menos medio millón de años tras la aparición del *Homo ergaster.* Tattersall señala que este

patrón típico de la estasis, seguido de saltos innovadores, es coherente con la noción de «exaptación», es decir: la evolución por selección natural siempre incorpora rasgos existentes para nuevos usos; no puede haber ningún «conocimiento previo» de que un rasgo determinado vaya a ser útil en el futuro. Las innovaciones, por tanto, surgen con independencia de las funciones para las que finalmente van a ser seleccionadas. A modo de un tamiz, la selección natural solo puede tamizar de manera diferencial con lo que se le presenta. Cualquier innovación ha tenido que ser creada necesariamente de alguna otra forma, como las pepitas de oro en el tamiz. Los ingredientes que anteceden al lenguaje, en un sentido, ya tenían que existir. Pero ¿cuáles eran esos ingredientes?

El modelo tripartito, aprendizaje vocal y genómica

Cualquier explicación del origen del lenguaje debe ocuparse de *lo* que ha evolucionado. En nuestro marco tripartito, eso se resuelve de manera natural con cada uno de los tres componentes esbozados anteriormente: 1) el operador combinatorio del Ensamble junto con elementos atómicos-palabras, más o menos el «CPU» [unidad central de procesamiento] de la sintaxis del lenguaje humano; y las dos interfaces, 2) la interfaz sensoriomotora que forma parte del sistema del lenguaje para la exteriorización, incluyendo el aprendizaje y la producción vocales, y 3) la interfaz conceptual-intencional, para el pensamiento. Aquí nos centraremos en 2), el aprendizaje y la producción vocal, con la mediación de la interfaz sensoriomotora.

Como hemos mencionado al principio del capítulo, gracias a modelos animales como el de los pájaros cantores, parece que los investigadores están cada vez más cerca de comprender el aprendizaje vocal; según parece, un componente de

procesamiento secuencial de «entrada-salida» genéticamente modular. Como sugieren Pfenning *et al*. (2014), este componente puede que sea relativamente uniforme de una especie de aprendizaje vocal a la siguiente porque solo puede haber unas pocas formas posibles de construir un sistema de aprendizaje vocal dadas las restricciones evolutivas y biofísicas. Esto no descarta la posibilidad de un afinamiento específico de una especie, como en el caso de la audición y el habla humanas, o los gestos y la percepción visual.

Esta imagen de «entrada-salida» coincide con la historia del *FOXP2*. Nuestra opinión es que el *FOXP2* es principalmente una parte del sistema que construye el componente 2), la interfaz sensoriomotora, que participa en la exteriorización de la sintaxis estrecha, más parecida a la impresora conectada a un ordenador que al CPU del ordenador. En el capítulo 3 discutimos la evidencia lingüística empírica de esta postura. Pero también hay otras pruebas. Un reciente trabajo con ratones transgénicos criados con *FOXP2* humanizado sugiere que la variante humana desempeña un papel en «la modificación de circuitos corticobasales ganglionares» potenciando la capacidad e cambiar las habilidades motoras adquiridas declarativamente a memoria procedimental, como aprender a montar en bicicleta (Schreiweis *et al*., 2014: 14253). Este hallazgo es perfectamente compatible con la visión de exteriorización. Este cambio de habilidades declarativas a habilidades motoras (inconscientes) parece ser exactamente lo que hacen los bebés humanos cuando aprenden a interpretar el exquisito baile de la boca, la lengua, los labios, el tracto vocal, o los dedos, a lo que llamamos habla o gestos. Desde luego, como dicen los autores, queda mucho por saber, ya que «desconocemos la relación de estos hallazgos con el efecto de [la] versión humanizada del Foxp2 en la configuración del desarrollo de un cerebro humano para hacer posible rasgos tales como la adquisición del lenguaje y el habla» (Schreiweis *et al*., 2014: 14257).

Al menos para nosotros, el experimento de Schreiweis junto con los resultados de Pfenning y sus colegas (Pfenning *et al*., 2014) confirman de manera sorprendente que el aspecto del aprendizaje y la producción vocal del sistema de exteriorización del lenguaje no es específicamente humano. Unos 600 millones de años de tiempo evolutivo nos separan de las aves; sin embargo, las regiones especializadas del canto y el lenguaje y la especialización genómica del aprendizaje vocal en las especies de pájaros cantores (por ejemplo, el pinzón cebra, el colibrí) y las del aprendizaje vocal de la especie humana parece que son espectacularmente, y convergentemente, parecidas. En cambio, las aves sin aprendizaje vocal (pollos, codornices, palomas) y los primates no humanos no vocales (macacos) no comparten dichas especializaciones genómicas con los que sí tienen aprendizaje vocal (ya sean pájaros cantores o humanos).

Pfenning *et al*. llevaron a cabo un cribado de miles de genes y perfiles de expresión génica en el cerebro de pájaros cantores, loros, colibríes, palomas, codornices, macacos y seres humanos, tratando de correlacionar niveles distintivos de expresión génica (ya fuera transcrita a un nivel alto o a un nivel bajo) contra una sofisticada descomposición jerárquica de regiones cerebrales conocidas en todas las especies estudiadas. El objetivo era descubrir si las subregiones donde ciertos genes tenían una expresión más o menos alta coincidían en una especie y en otra en el caso de los que tenían aprendizaje vocal (pájaros cantores, loros, colibríes, humanos) como contrapuestos a los que no tenían aprendizaje vocal (palomas, codornices, macacos). La respuesta fue que sí: en todos los que tenían aprendizaje vocal coincidían los mismos perfiles de transcripción genómica, pero no así entre los aprendices vocales y los no vocales. Si imaginamos los genes como un conjunto de controles de sonido y tono de un amplificador, pues todos estaban «afinados» de un modo paralelo en las

especies con aprendizaje vocal; y el afinamiento era diferente en comparación con las especies sin aprendizaje vocal.

Por ejemplo, tanto los pájaros cantores como los humanos tienen una regulación descendiente comparable del gen de orientación axonal *SLIT1* (un ADN objetivo de *FOXP2*) en regiones cerebrales análogas, la llamada región aviar, RA («núcleo sólido del arcopallium»), y la corteza motora laríngea humana. Como Pfenning *et al*. indican, el producto proteína *SLIT1* «trabaja conjuntamente con el receptor de orientación axonal *ROBO1*, Ylas mutaciones de *ROBO1* causan trastornos de dislexia y del habla en los seres humanos. […] *ROBO1* es uno de los cinco genes candidatos con sustituciones aminoácidas convergentes en los mamíferos con aprendizaje vocal» (2014: 2156846-10). El gen *SLIT1* es evidentemente parte de una red de desarrollo con la que están bien «cableados» los cerebros de los pájaros cantores y de los humanos.

Como *FOXP2*, muchos de los genes descubiertos desde este enfoque regulan ascendiente o descendientemente el ADN y sus correspondientes productos proteína. Pero aún no sabemos cómo están causalmente entrelazados entre sí. Pfenning (comunicación personal) tiene planeados los próximos pasos para el seguimiento, por lo menos, de una parte de ello. Se trata de encontrar los motivos por los que el ADN «regula a los reguladores». Este es precisamente el enfoque correcto, y apunta hacia lo que hemos visto acerca de la evolución y el cambio evolutivo. Sabemos, desde el análisis pionero de King y Wilson (1975), que los humanos y los chimpancés son idénticos en un 99% macromolecularmente –las proteínas que participan en la bioquímica que opera en los organismos– y que dicha identidad es probablemente incluso más fuerte si comparamos a los humanos con nuestros antepasados no humanos. King y Wilson llegaron a una evidente e importante conclusión: las diferencias entre los seres humanos y los chimpancés deben hallarse sobre todo en elementos

reguladores. Lo que esto significa es que cambios en los genes que codifican proteínas podrían no estar donde tiene lugar la acción evolutiva, tal vez sobre todo en la evolución que nos hizo humanos, ya que ese ha sido un acontecimiento relativamente reciente.

Durante los últimos cuarenta años, las importantes ideas de King y Wilson se han confirmado con creces, incluido tanto e ADN no codificante como todos los demás componentes que regulan la actividad génica, desde el andamio de cromatina que rodea el ADN, hasta la regulación del ADN por el micro ARN durante el desarrollo, en particular el desarrollo cerebral, parte de la llamada revolución evo-devo (Somel, Liu y Khaitovich, 2011).

Aquí nos centraremos en un solo factor del sistema regulador genético que controla elADN, los llamados *potenciadores*, y en por qué este tipo de evolución reguladora ha resultado ser tan importante. (Aquí no tenemos espacio para considerar otras regiones genómicas que parecen ser relevantes en los cambios evolutivos, por ejemplo los llamados elementos reguladores en cis; véase Wray, 2007). Un potenciador es un tramo corto de ADN, de unos 1.500-2.000 nucleótidos de ADN de largo (adenina, timina, citosina, guanina), que no codifica una proteína funcional como el gen *HBB* para la cadena de proteína hemoglobina beta-globina, o el gen *FOXP2* para la proteína FOXP2. Un potenciador no codifica ninguna proteína, por lo que se llama ADN no codificante. ¿Su función? Un potenciador está a una distancia «hacia arriba» o «hacia abajo» respecto al punto de partida de un gen codificante de proteína, tal vez hasta a un millón de nucleótidos de ADN de distancia, y luego «se tuerce» para ponerse en contacto con ese punto de partida junto con los otros ingredientes necesarios para activar la transcripción de ADN –un promotor, ARN polimerasa II y cualquier factor de transcripción (tal vez incluso el propio FOXP2)–. Una vez que todos los componentes están en su

sitio, entonces (algo caprichosamente) la bujía del promotor hace chispa y el motor de transcripción de ADN se pone en marcha.

Desde el punto de vista de la evolución, los potenciadores son interesantes por dos razones como mínimo. En primer lugar, tienen una focalización más precisa que el ADN codificante de proteína. A diferencia del ADN codificante de proteína, que puede ejercer (de hecho, por lo general, lo hace) más de una función en un organismo, empleándose en muchos tejidos y células diferentes, un potenciador afecta solo a un trozo de ADN, y así se sintoniza con un contexto único y muy particular, en combinación con promotores y factores de transcripción. En consecuencia, es más fácil mutar un potenciador sin causar efectos no locales adversos. Un potenciador es *modular*. Eso es perfecto para la experimentación en evolución: no hay que preocuparse por si se rompe una complicada máquina por hurgar en ella con una llave inglesa. En segundo lugar, un potenciador se asienta en solo una de las dos hebras de ADN (por lo general, la misma hebra que el propio ADN codificante de proteína). Esto es diferente de lo que pasa con un gen de ADN codificante de proteína, que puede que necesite estar en ambas hebras de ADN –en un estado llamado de homocigosis, con el fin de surgir como fenotipo–, como el típico caso de los ojos azules. Y esta es una segunda ventaja evolutiva: un organismo no tiene que esperar a un cambio en las dos hebras de ADN. La cuestión es que los retoques evolutivos son en principio mucho más fáciles con potenciadores –hay más de 100.000 en los seres humanos, todos ellos singularizando contextos genéticos específicos–. No debería ser ninguna sorpresa que este sea el primer lugar en el que los investigadores aviares sondeen a continuación para avanzar en nuestros conocimientos del aprendizaje vocal aviar y humano. Esta línea de pensamiento ha sido confirmada recientemente por la primera confirmación funcional de

una diferencia en el ADN de humanos y de chimpancés que fomenta la división celular de la neurona, como se describe a continuación (Boyd *et al*., 2015).

Volviendo a la imagen general, ¿cuáles son las implicaciones evolutivas de los resultados obtenidos con relación al aprendizaje vocal? Pfenning *et al*. (2014: 1333) concluyen su resumen con lo siguiente: «El hallazgo de que los circuitos neuronales convergentes para el aprendizaje vocal van acompañados de cambios moleculares convergentes de múltiples genes en especies separadas por millones de años a partir de un ancestro común, indica que los circuitos cerebrales de los rasgos complejos puede que tengan maneras limitadas de haber evolucionado a partir de dicho antepasado». En otras palabras, la «caja de herramientas» para la construcción del aprendizaje vocal podría consistir en un paquete (conservado) de quizás unas 100-200 especializaciones de genes independientemente de las especies que pueden ser «puestas en marcha» de prisa, y así evolucionar con relativa rapidez. Esto encaja en nuestra imagen general de la aparición relativamente rápida del lenguaje, así como con nuestra metodología para distinguir entre la evolución del sistema de exteriorización de «entrada-salida» y el «procesador central» de la sintaxis del lenguaje humano.

¿Qué más nos puede decir la biología molecular moderna acerca de la evolución del cerebro y el lenguaje humanos? No es este el lugar donde podamos hacer justicia a este campo en rápida expansión, solo podremos destacar algunos puntos clave junto con los principales y bien conocidos obstáculos.

En primer lugar, gracias a los recientes trabajos con ADN antiguo, ahora podemos averiguar cuántas diferencias genómicas y de qué tipo es de esperar que encontremos, y luego ver cómo se alinea esto con las diferencias genómicas conocidas entre nosotros y los genomas secuenciados de neandertales, denisovanos y chimpancés. En cuanto a las diferencias espe-

radas, la separación de nuestros extintos antepasados *Homo*, como los neandertales, se produjo hace relativamente poco –entre 500.000 y 700.000 años– y los humanos modernos aparecieron en el sur de África hace unos 200.000 años; por tanto, hay alrededor de 200.000 años de evolución entre estos dos acontecimientos. Podemos utilizar herramientas teóricas de genética poblacional, incluidos los cálculos de la fuerza selectiva, el tamaño de población y los índices de mutación de ADN, para calcular cuántas regiones genómicas distintas seleccionadas positivamente es de esperar encontrar que se hayan fijado en la población humana –es decir, sin variación en los humanos modernos, por tanto, que se suponen funcionalmente importantes–, pero que son diferentes en las especies no humanas. Varias fuentes han calculado que lo que llamamos tamaño efectivo poblacional para los seres humanos de hace 200.000 años era alrededor de 10.000; un tamaño relativamente pequeño en comparación con muchos otros mamíferos (Jobling *et al*., 2014). Calcular la fuerza selectiva –eficacia, denominada *s*– es problemático en cualquier situación, pero podemos utilizar datos de uno de los recientes signos de selección poblacional más fuertes, los correspondientes al gen *LCT* de persistencia de lactasa (Tishkoff *et al*., 2007), que da un límite superior de 0,10. Es extremadamente alto. Dados todos estos parámetros, un análisis reciente estima que podría haber habido 700 mutaciones beneficiosas, y solo sobrevivir hoy 14 de ellas fijadas en la población humana, incluso dada una fuerte ventaja selectiva de $s = 0{,}01$ (Somel, Liu y Khaitovich, 2013). El bajo número de supervivencia se debe al efecto del «pozo de gravedad estocástica» descrito en el apartado anterior, con una probabilidad de pérdida aproximadamente de $(1- s/2)$, es decir, el 98% de 700, o 686 se perdieron y 14 se fijaron.

Este cálculo teórico resulta aproximarse bastante a los hallazgos empíricos. La secuenciación de todo el genoma de

neandertales y denisovanos indica que hay 87 y 260 diferencias genómicas funcionales (cambian los aminoácidos), respectivamente, que están fijadas en los humanos modernos, pero que no están presentes en estas dos especies extintas (Pääbo, 2014a, complementario tabla 1). Como escribe Pääbo, tales diferencias son de especial importancia porque al menos desde el punto de vista genómico remarcan lo que nos hace humanos. Centrándonos en las diferencias de los neandertales, solo hay 31.389 diferencias de nucleótido único de ADN (polimorfismos de nucleótido único, o SNP) de las aproximadamente 4.000 millones posibles; 125 inserciones o deleciones de nucleótidos de ADN; 3.117 diferencias en las regiones reguladoras (usando una definición particular de «reguladoras»); y solo 96 diferencias en total en los aminoácidos, en 87 genes. (Algunos genes tienen más de una sola diferencia en un aminoácido). ¿Qué nos dice esta «lista de diferencias»?

Muchas –la mayoría– de las 30.000 y pico de las diferencias SNP presumiblemente no marcan ninguna diferencia en el tamiz de la selección natural; son «neutras». De acuerdo con Pääbo, dejemos a un lado por el momento las casi 3.000 diferencias reguladoras. Quedémonos solo con las 87 diferencias codificantes de proteínas que hay entre nosotros y los neandertales, no muchas. Por ejemplo, aparentemente compartimos con los neandertales la misma proteína FOXP2, aunque hay cierta evidencia de una región reguladora para *FOXP2* que no se ha fijado en el ser humano y cuyas variantes son un poco diferentes de las de los neandertales, como veremos en el capítulo 4.[10] De los genes que codifican diferentes proteínas, algunos es casi seguro que no están relacionados con el lenguaje y la cognición. Por ejemplo, por lo menos tres de los diferentes genes participan en la formación de la piel, y tiene lógica, dada la pérdida humana del vello corporal y los cambios resultantes en la pigmentación de la piel.

Otras diferencias genómicas parecerían candidatas más probables a la evolución cognitiva. Por ejemplo, Pääbo señala que hay tres variantes de genes que nosotros tenemos pero los neandertales no –*CASC5*, *SPAG5* y *KIF18A*–. Estos genes participan en la división celular neural en la denominada «zona proliferativa», donde las células madre se dividen para construir el cerebro (Pääbo, 2014a). Sin embargo, en el momento de escribir estas líneas no sabemos si las proteínas a las que estos genes codifican dan lugar realmente a diferentes resultados del desarrollo o fenotipos en nosotros como opuestos a los neandertales: cerebros más grandes o diferentes, o, más concretamente, cerebros más grandes en los lugares adecuados, ya que la capacidad craneal neandertal era de promedio mayor que la nuestra, aunque tal vez más sesgada en la parte trasera, occipital, del cerebro. Y ese es el principal obstáculo que tenemos que superar: averiguar el camino que va del genotipo al fenotipo.

Sabemos la respuesta a la pregunta funcional en el caso de al menos una diferencia reguladora genómica implicada en el desarrollo del cerebro, una diferencia entre nosotros y los otros grandes monos, pero no con los neandertales (Boyd *et al*., 2015). Hay un aumento general de la capacidad craneana y del tamaño del cerebro a lo largo del linaje *Homo*, desde el *Homo habilis* hace unos 2-2,8 millones de años, con una capacidad craneal recién recalculada de 727 a 846 cm^3, hasta el *Homo erectus*, en torno a 850-1.100 cm', y agrandándose a partir de allí. El linaje *Homo* difiere aquí de los otros grandes monos. ¿Qué ha impulsado la expansión del cerebro? Si nos fijamos en las regiones potenciadoras en los seres humanos que experimentan una evolución acelerada, resulta que muchas se encuentran cerca de los genes que participan en la construcción de nuestro cerebro (Prabhakar *et al*., 2006; Lindblad-Toh *et al*., 2011). Boyd y colegas se concentraron en uno de estos potenciadores que difieren entre nosotros y los

chimpancés, *HARE5*, y produjeron ratones transgénicos con la forma humana o de chimpancé de *HARE5*. ¿Mostraron los diferentes ratones diferentes patrones de crecimiento cortical? Sí: los ratones humanizados aumentaron el tamaño de su cerebro aproximadamente un 12% más en comparación con los ratones normales o con los de *HARE5* de chimpancé-ratón, al parecer debido a un incremento en el índice de división celular de las células madre neurales. Tal como se ha descrito más arriba, el potenciador *HARE5* trabaja en colaboración con la región promotora de un gen clave implicado en la ruta del desarrollo neocortical, el *FZD8*. Esta investigación apunta hacia un camino –sin duda laborioso–, hacia la confirmación experimental de los efectos fenotípicos para los 87 genes de la lista de diferencias entre neandertales y humanos. Pero tenemos que saber más. Aunque sepamos que el *HARE5* estimula el crecimiento del cerebro, todavía nos queda por saber cómo se engarza este crecimiento del cerebro en el fenotipo cognitivo que llamamos lenguaje.

¿Qué hay de las 3.000 y pico diferencias reguladoras? Somel y sus colegas apuntan que «cada vez hay más pruebas de que el desarrollo del cerebro humano se reconfiguró fundamentalmente a través de varios acontecimientos genéticos en el corto espacio de tiempo entre la división entre humanos y neandertales y la aparición de los humanos modernos» (Somel, Liu y Khaitovich, 2013: 119). Estos autores señalan una diferencia concreta entre los neandertales y nosotros: un tramo de ADN regulador que aparece en la parte alta de un regulador del crecimiento sináptico, el *MEF2A* (factor potenciador de miocito 2). A esto le llaman «regulador transcripcional potencial de desarrollo sináptico extendido en el córtex cerebral humano», una notable característica del desarrollo humano, un largo período de la infancia (Somel, Liu y Khaitovich, 2013: 119). Sin embargo, como explicación de un pequeño tramo de ADN es una carga muy pesada de sobrellevar.

Otros nuevos genes y elementos reguladores que tienen que ver con la morfología craneal y el crecimiento neuronal se han ido acumulado en ruta desde nuestro último ancestro común con los chimpancés hasta el día de hoy, otra vez común al linaje *Homo*. Por ejemplo, se sabe que el gen *SRGAP2* desempeña un papel en el desarrollo cortical y la maduración de las neuronas en los humanos. Se ha duplicado tres veces en el linaje que lleva hasta nosotros, una de las cuales ocurrió justo en el momento en que apareció el linaje *Homo*, hace 2-3,5 millones de años (Jobling *et al*., 2014: 274). Dichas duplicaciones de genes se sabe que ejercen papeles importantes en la innovación evolutiva, ya que permiten que uno de los duplicados «flote libremente» y asuma nuevas funciones (Ohno, 1970). Véase la nota 9.

¿Cuál es el balance final? Tal vez la pregunta del millón sea si los neandertales tenían lenguaje. El número de diferencias genómicas entre nosotros y los neandertales y los denisovanos es lo bastante pequeño como para que algunos autores respondan que sí. Seguimos siendo escépticos. No entendemos la base genómica o neural de «propiedad básica». Es casi imposible decir siquiera si anatómicamente los humanos modernos hace 80.000 años tenían lenguaje. Todo lo que tenemos son representantes simbólicos del comportamiento del lenguaje. Junto con Tattersall (2010) observamos que la prueba material del comportamiento simbólico neandertal es excepcionalmente escasa. Por el contrario, los humanos anatómicamente modernos del sur de África hace unos 80.000 años muestran signos claros de comportamiento simbólico –antes de su éxodo a Europa–. Volveremos a ello en el capítulo 4.

Nuestro problema general es que conocemos muy poco de cómo se llevan a cabo incluso las operaciones computacionales más básicas en el «cerebro» neural. Por ejemplo, como Randy Gallistel ha subrayado en repetidas ocasiones, lo primero que cualquier científico informático querría saber

sobre un ordenador es cómo escribe en la memoria y lee en la memoria –las operaciones esenciales del modelo de la máquina de Turing y, en última instancia, de cualquier dispositivo computacional–. Sin embargo, no sabemos muy bien cómo se implementa en el cerebro este elemento de la computación que es el fundamental (Gallistel y King, 2009). Por ejemplo, una de las propuestas que suelen hacerse sobre la implementación del procesamiento de la estructura jerárquica en el lenguaje es una especie de red neuronal recurrente con decrecimiento exponencial para emular «un autómata de pila» (Pulvermüller, 2002). Es una lástima que unos simples cálculos bioenergéticos muestren que es poco probable que esto sea correcto. Como observa Gallistel, cada potencial de acción o «pico» requiere la hidrolisis de 7×10^8 moléculas de ATP (la «batería» molecular básica de almacenamiento de las células vivas). Suponiendo una operación por pico, Gallistel calcula que harían falta del orden de 10^{14} picos por segundo para lograr la capacidad de procesamiento de datos requerido. Bien, dedicamos mucho tiempo a pensar y leer libros como estos que nos hacen hervir la sangre, pero probablemente no sea para tanto. Cualquier método basado en los trenes de impulsos neurales está plagado de este tipo de problemas, incluidos los enfoques de estado dinámico, dificultades que a menudo es como si se ignorasen; (véase Gallistel y King, 2009, para más detalles). Siguiendo la moda de colocar nombres a los problemas clave de la ciencia cognitiva del lenguaje, por ejemplo «problema de Platón» y «problema de Darwin», a este lo llamamos «problema de Gallistel». El capítulo 4 tiene más cosas que decir sobre el problema de Gallistel en el contexto de la computación y el Ensamble.

Hace casi cincuenta años, Marvin Minsky, en su libro de 1967 *Computaction: Finite and Infinite Machines*, planteó el problema de Gallistel prácticamente con las mismas palabras, destacando lo poco que han cambiado las cosas: «Por des-

gracia, todavía hay muy pocos conocimientos definidos, y ni siquiera una teoría generalmente aceptada, acerca de cómo se almacena la información en los sistemas nerviosos, es decir, cómo *aprenden*. […] Una forma teórica proponía que la memoria corta es "dinámica", se almacena en forma de impulsos que reverberan alrededor de cadenas de neuronas cerradas. […] Recientemente, han aparecido una serie de publicaciones en las que se propone que la memoria se almacena, como la información genética, en forma de cadenas de ácidos nucleicos, pero no he visto que ninguna de estas teorías se haya elaborado para incluir mecanismos plausibles de carga y descarga de la información» (Minsky, 1967: 66). Hasta donde podemos ver, las palabras de Minsky todavía suenan a verdad, y el problema de Gallistel sigue sin resolverse. Eörs Szathmáry está en lo cierto cuando escribe que «la lingüística está en la etapa en la que se encontraba la genética inmediatamente después de Mendel. Hay reglas (de producción de oraciones), pero todavía no sabemos qué mecanismos (redes neuronales) son responsables de ellas» (1996: 764).

Por mucho que nos gustaría saber lo que nos hace humanos, y cómo surge el lenguaje genéticamente, nos parece inquietante que los científicos todavía tengan que encontrar alguna prueba *inequívoca* de la obra de la selección natural, un «barrido selectivo» positivo, que ocurrió aproximadamente cuando el *Homo sapiens* apareció por primera vez como especie. Acaso este sea un hecho inevitable en nuestro imperfecto conocimiento de nuestra historia demográfica pasada, así como la relativa rareza de los barridos selectivos; pudiera ser que la evolución simplemente hiciera uso de variaciones ya presentes en la población, como sostienen Coop y Przeworski (Jobling, 2014: 204).[11] En cualquier caso, como siguen diciendo, los análisis genéticos de rasgos como el lenguaje son «ahora un reto crucial para la genética evolutiva humana» (Jobling, 2014: 204). No podríamos estar más de acuerdo.

2. LA BIOLINGÜÍSTICA EVOLUCIONA

Antes de examinar el lenguaje, especialmente en un contexto biológico, debemos tener claro lo que queremos decir con este término, que ha dado lugar a mucha confusión. A veces, el término «lenguaje» se utiliza para referirse al lenguaje humano; a veces, se usa para referirse a cualquier sistema simbólico o modo de comunicación o representación, como cuando se habla de la lengua de las abejas, o de lenguajes de programación, o del lenguaje de las estrellas, etcétera. Aquí vamos a ceñirnos al primer significado: el lenguaje humano, un objeto determinado del mundo biológico. El estudio de la lengua, así entendido, se ha dado en llamar perspectiva *biolingüistica*.

Entre las muchas preguntas enigmáticas sobre el lenguaje, sobresalen dos: en primer lugar, ¿por qué tiene que existir lengua alguna, evidentemente un rasgo exclusivo del linaje humano, lo que los biólogos evolutivos llaman una «autoapomorfia»? En segundo lugar, ¿por qué existen tantas lenguas? De hecho, estas son las preguntas básicas acerca del origen y la variación que tanto preocuparon a Darwin y a otros pensadores evolutivos y que constituyen el núcleo aclaratorio de la biología moderna: ¿Por qué observamos *este* conjunto

concreto de formas de vida en el mundo y no otras? Desde este punto de vista, la ciencia del lenguaje se encuentra de lleno dentro de la tradición biológica moderna, a pesar de sus detalles aparentemente abstractos, como a menudo se ha observado.

De acuerdo con un consenso bastante general entre los paleoantropólogos y arqueólogos, estas preguntas son muy recientes en el tiempo evolutivo. Hace aproximadamente 200.000 años, la primera pregunta no se planteaba, porque no había lenguas. Hace unos 60.000 años, se establecieron las respuestas a ambas preguntas: nuestros antepasados comenzaron su último éxodo desde África, extendiéndose por todo el mundo, y, hasta donde sabemos, la facultad del lenguaje no ha experimentado ningún cambio esencial desde entonces, lo cual no es sorprendente en un período tan breve. Las verdaderas fechas aún son inciertas, y no importan mucho para lo que aquí nos interesa. La imagen de conjunto parece ser más o menos exacta. Es más importante observar que un bebé de una tribu amazónica, que viva en la Edad de Piedra y que se traiga a Boston, no se distinguirá ni lingüísticamente ni en otras funciones cognitivas de los niños nacidos en Boston cuyos ascendentes fueron los primeros colonos ingleses; y lo mismo al contrario. Esta uniformidad mundial de la capacidad del lenguaje en nuestra especie –la «facultad del lenguaje»– sugiere con fuerza que se trata de un rasgo en los seres humanos anatómicamente modernos que ya debió aparecer antes del éxodo de nuestros antepasados africanos y su dispersión por todo el mundo, un hecho que ya señaló Eric Lenneberg (1967: 261). Por lo que sabemos, pues, patologías aparte, la facultad del lenguaje es uniforme en la población humana.[12]

Por otra parte, si nos remontamos hasta donde nos permiten los antecedentes históricos, las propiedades paramétricas fundamentales del lenguaje humano se han mantenido fijas, solo han variado dentro de límites prescritos. Ninguna lengua

ha utilizado nunca el «contar» para formar una oración pasiva, como *La manzana fue comida*, colocando una palabra marcadora especial después de, digamos, la tercera posición en la oración, un resultado en consonancia con los recientes estudios por imagen del cerebro (Musso *et al*., 2003). De una manera muy diferente a los lenguajes informáticos, las lenguas humanas admiten la posibilidad del «desplazamiento», es decir, que las frases se interpretan semánticamente en una posición, pero se pronuncian en otra, como en *¿Qué adivinó John?* [*What did John guess?*], de nuevo una propiedad derivada del Ensamble. Todas las lenguas humanas surgen de un inventario fijo y finito, un conjunto básico de gestos articulatorios, por ejemplo, que vibren o no las cuerdas vocales y distingan así *b* de *p*, pero no todas las lenguas distinguen entre *b* y *p*. En pocas palabras, las «variantes del menú» por las que las lenguas opten pueden variar, pero lo que contiene el menú, no. Se puede subir y bajar el «dobladillo del lenguaje» utilizando modelos de sistemas dinámicos y sencillos, como demuestran Niyogi y Berwick (2009) en relación al cambio experimentado en la lengua inglesa, que pasa de ser una lengua como *et al*emán, con verbo al final, a una forma más moderna, pero este tipo de cambio en el tipo de lengua no debe confundirse con la evolución del lenguaje *per se*.

De modo que lo que nos interesa es un curioso objeto biológico, el lenguaje, que ha aparecido en la Tierra hace bastante poco. Es una propiedad específica de los humanos, un atributo común que carece de variaciones significativas aparte de patologías graves, diferente de cualquier otra cosa conocida en el mundo orgánico en sus elementos esenciales, y sin duda fundamental para la vida humana desde el momento de su aparición. Es un componente fundamental de lo que el cofundador de la teoría evolutiva moderna, Alfred Russel Wallace (1871: 334), llamó «la naturaleza moral e intelectual del hombre»: las habilidades humanas para la imaginació

creativa, para el lenguaje y el simbolismo en general, para el registro e interpretación de los fenómenos naturales, para prácticas sociales complejas y cosas similares, un conjunto que a veces recibe una sencilla denominación como «capacidad humana». Este conjunto de habilidades parece que cristalizó hace relativamente poco tiempo entre un pequeño grupo en el este de África, de los cuales todos somos descendientes, distinguiéndose marcadamente los humanos contemporáneos de otros animales, con enormes consecuencias para la totalidad del mundo biológico. Es un supuesto compartido en general y plausible que la aparición del lenguaje fue un elemento crucial en esta transformación súbita y espectacular. Además, el lenguaje es uno de los componentes de la capacidad humana que puede ser estudiado con cierta profundidad. Esa es otra razón por la que incluso las investigaciones que tienen un carácter puramente «lingüístico», de hecho, se incluyen en el apartado de la biolingüística, a pesar de lo que esta dista, superficialmente, de la biología.

Desde la perspectiva biolingüística, podemos pensar en el lenguaje, considerado en su esencia, como un «órgano del cuerpo», más o menos parejo a los sistemas visual, digestivo o inmune. Al igual que otros, es un subcomponente de un organismo complejo con la suficiente integridad interna para que tenga sentido estudiarlo abstrayéndolo de sus complejas interacciones con otros sistemas en la vida del organismo. En este caso, se trata de un órgano cognitivo, como los sistemas de planificación, interpretación, reflexión, y todos los que se incluyan entre los aspectos del mundo «denominados mentales» de una manera laxa, que de alguna manera se reduce a la «estructura orgánica del cerebro», dicho con las palabras del científico y filósofo del siglo XVIII Joseph Priestley (1775: xx). Priestley articuló la conclusión natural después de que Newton demostrara, para gran consternación e incredulidad del propio Newton, que el mundo no es una máquina, en

contra de las suposiciones básicas de la revolución científica del siglo XVII; una conclusión que efectivamente acababa con el tradicional problema mente-cuerpo, porque ya no hay un concepto coherente de *cuerpo* (*materia*, *físico*), una cuestión bien comprendida en los siglos XVII y XIX. Podemos pensar en el lenguaje como un órgano mental, donde el término *mental* solo se refiere a ciertos aspectos del mundo, y que tiene que ser estudiado igual que se estudia lo químico, lo óptico, lo eléctrico y otros aspectos, con la esperanza de llegar finalmente a una unificación, e indicando que, en el pasado, dicha unificación en los otros campos mencionados se logró a menudo por caminos completamente inesperados, no necesariamente por reducción.

Como hemos mencionado al principio, con relación al curioso órgano mental del *lenguaje*, se plantean dos preguntas obvias. Una es: ¿Por qué existe solo en nuestra especie? La segunda: ¿Por qué hay más de una lengua? Mejor dicho, por qué existen tantas y en tanta variedad, que parece que las lenguas «difieran unas de otras ilimitadamente y de formas impredecibles», y, por tanto, el estudio de cada lengua tiene que emprenderse «sin ningún plan preexistente de lo que una lengua debe ser», y aquí citamos la formulación de Martin Joos (1957: 96), el gran y destacado teórico de la lingüística, que hizo hace más de cincuenta años. Joos estaba resumiendo la que él llamaba plausiblemente «tradición boasiana» imperante en aquel momento, siguiendo su rastro hasta la obra de uno de los fundadores de la antropología moderna y la lingüística antropológica, Franz Boas. La publicación que puso los cimientos de la lingüística estructural estadounidense en la década de 1950, *Methods in Structural Linguistics* (1951), de Zellig Harris, se denominó «Métodos» precisamente porque parecía que poco había que decir sobre el lenguaje más allá de los métodos para reducir los datos de lenguas ilimitadamente variables a una forma organizada. El estructuralismo europeo

consistió prácticamente en lo mismo. Una concepción parecida tenía la clásica introducción al análisis fonológico de Nikolai Trubetzkoy (1969). En general, las investigaciones estructuralistas se centraron casi por completo en la fonología y la morfología, los campos en los que las lenguas parecen diferir ampliamente y en formas complejas, una cuestión de interés más amplio, a la que volveremos.

El paisaje dominante en la biología general en aquella época era bastante parecido, y Gunther Stent (1984: 570), biólogo molecular, lo describió al observar que la variabilidad de los organismos es tan libre como para constituir «casi una infinidad de casos particulares que tienen que ser resueltos caso por caso».

En realidad, el problema de conciliar unidad y diversidad se ha planteado constantemente en la biología en general, así como en la lingüística. El estudio del lenguaje desarrollado dentro de la revolución científica del siglo XVII distinguía entre gramática universal y gramática particular, aunque no exactamente en el sentido del enfoque biolingüístico contemporáneo. La gramática universal se consideraba el núcleo intelectual de la disciplina; las gramáticas particulares se veían como instanciaciones accidentales del sistema universal. Al florecer la lingüística antropológica, el péndulo se decantó hacia el otro lado, hacia la diversidad, bien articulado en la formulación boasiana mencionada. En la biología general, la cuestión se había planteado sin ambages en un famoso debate entre los naturalistas Georges Cuvier y Geoffroy St. Hilaire, en 1830. La posición de Cuvier, haciendo hincapié en la diversidad, prevaleció, sobre todo después de la revolución darwiniana, y desembocó en las conclusiones acerca de la «casi infinitud» de la variedad que tenía que resolverse caso por caso. Acaso la frase más citada en biología sea la observación final de Darwin en el *Origen de las especies* sobre cómo «a partir de un principio tan simple, han evolucionado,

y siguen evolucionando, un sinfín de formas tan bellas y maravillosas (Darwin, 1859: 490). Sean Carroll (2005), biólogo evolutivo, adoptó estas palabras como título de su introducción a la «nueva ciencia de la evo-devo [evolución y desarrollo]», que pretende demostrar que las formas que han evolucionado están lejos de ser infinitas; de hecho, son marcadamente uniformes.

La conciliación de la aparente diversidad de formas orgánicas con su evidente uniformidad subyacente –¿por qué vemos esta variedad de seres vivos en el mundo y no otras, igual que por qué lo que vemos es esta variedad de lenguas/gramáticas y no otra?– se produce por la interacción de tres factores, de cuya conocida articulación se encargó el biólogo Monod en su libro *Le hasard et la nécessité* (1970). Primero, existe el hecho históricamente contingente de que todos somos descendientes comunes de un solo árbol de la vida, y, por tanto, compartimos unos antepasados comunes con todos los demás seres vivos, que al parecer han explorado solo una fracción de minuto de un espacio que incluye un conjunto mayor de posibles resultados biológicos. Ya no debería ser una sorpresa, pues, que tengamos en común genes, vías bioquímicas y muchas otras cosas.

Segundo, están las limitaciones fisicoquímicas del mundo, necesidades que delimitan las posibilidades biológicas, como por ejemplo la casi imposibilidad de que existan ruedas para la locomoción debido a la dificultad física de dotar de control nervioso y suministrar sangre a un objeto giratorio.

Tercero, existe el efecto de tamizado de la selección natural, que criba a partir de un menú de posibilidades preexistente –ofrecido por la contingencia histórica y las limitaciones fisicoquímicas–, el conjunto real de organismos que observamos en el mundo que nos rodea. Tengamos en cuenta que el efecto del limitado menú de opciones es de la mayor importancia; si las opciones son extremadamente limitadas, entonces la selección tendrá muy poco que elegir: no es ninguna sorpresa

que cuando alguien entra en un restaurante de comida rápida, suela salir con una hamburguesa y patatas fritas. Como decía Darwin (1859: 7), la selección natural no es de ningún modo el «único» medio que ha configurado el mundo natural: «Además, estoy convencido de que la Selección Natural ha sido el principal medio de modificación pero no el único».

Descubrimientos recientes han reforzado el enfoque general de D'Arcy Thompson ([1917] 1942) y Alan Turing sobre los principios que limitan la variedad de organismos. Según palabras de Wardlaw (1953: 43), la verdadera ciencia de la biología debería considerar cada «organismo vivo como un tipo especial de sistema al que le son aplicables las leyes generales de la física y la química», limitando drásticamente su posible variedad y fijando sus propiedades fundamentales. Puede que esta perspectiva suene hoy menos radical tras el descubrimiento de genes maestros, homologías profundas y conservación, y muchas más cosas, acaso incluso restricciones tan severas de los procesos evolutivos/del desarrollo que «reproducir la cinta de la proteína de la vida podría ser sorprendentemente repetitivo». Aquí citamos un informe de Poelwijk *et al*. (2007: 113) sobre rutas mutacionales factibles, en que reinterpreta una famosa imagen de Stephen Gould, quien sugirió que en el caso de volver a reproducir la cinta de la vida, esta podría seguir caminos diversos. Como además indica Michael Lynch (2007: 67): «Hace décadas que sabemos que todas los eucariotas comparten la mayoría de los mismos genes de la transcripción, la traducción, la replicación, la absorción de nutrientes, el metabolismo básico, la estructura del citoesqueleto, etcétera. ¿Por qué tenemos que esperar algo distinto en relación al desarrollo?».

En una revisión del enfoque de la evo-devo, Gerd Müller (2007: 947) se refiere a lo mucho que se ha concretado nuestro conocimiento sobre los modelos de patrones de Turing, y hace la observación siguiente:

> Las formas genéricas […] son el resultado de la interacción de propiedades básicas de la célula con diferentes mecanismos de configuración de patrones. Cuando diferentes tipos de mecanismos físicos y químicos de patrones modulan adhesiones y polaridad celular diferenciales […] conducen a motivos organizacionales estándar. […] Las propiedades de adhesión diferencial y su distribución polar en las superficies celulares conducen a esferas huecas cuando se combinan con una gradiente de difusión, y a esferas invaginadas cuando se combinan con un gradiente de sedimentación. […] La combinación de adherencia diferencial con un mecanismo de reacción-difusión genera estructuras periódicas radiales, mientras que una combinación con oscilación química da como resultado estructuras periódicas en serie. Los planes corporales metazoanos representan una explotación de dichos repertorios de configuración genéricos.

Por ejemplo, el hecho contingente de que tengamos cinco dedos en la mano y cinco en los pies se explica mejor recurriendo a cómo se desarrollan los dedos de pies y manos que al hecho de que cinco es óptimo para su función.[13]

Según sostiene el bioquímico Michael Sherman (2007: 1873), algo más controvertidamente, un «Genoma Universal que codifica los principales programas de desarrollo fundamentales para diversos filos de metazoos surgió en un organismo unicelular o en uno multicelular primitivo poco antes del período cámbrico», hace unos 500 millones de años, cuando se produjo una súbita explosión de formas animales complejas. Sherman (2007: 1875) argumenta, además, que muchos «filos metazoos, todos con genomas parecidos, son no obstante tan distintos porque utilizan combinaciones específicas de los programas de desarrollo». Según esto, no hay más que un solo animal multicelular desde un punto de vista suficientemente abstracto –el punto de vista que seguramente adoptaría un científico de Marte de una civilización mucho

más avanzada que observara lo que ocurre en la Tierra–. La variedad superficial derivaría en parte de diferentes ajustes de una «caja de herramientas del desarrollo-genéticas», como a veces se llama, conservada evolutivamente. Si resulta que esta clase de ideas están bien encaminadas, el problema de la unidad y la diversidad se hubiese reformulado de tal manera que algunas de las últimas generaciones de científicos se hubieran sorprendido. Saber hasta qué punto la caja de herramientas conservada es la única explicación de la uniformidad observada es algo que merece cierta atención. Como se ha dicho, la uniformidad observada se debe, en parte, a que simplemente no ha habido tiempo suficiente, y la ascendencia contingente por descendientes impide la posibilidad de explorar «mucho» el espacio genético-proteínico-morfológico, sobre todo dada la práctica imposibilidad de «ir hacia atrás» e iniciar la búsqueda de nuevo para lograr un mejor resultado. Teniendo en cuenta estas limitaciones inherentes, sorprende mucho menos que todos los organismos estén construidos de acuerdo con un determinado conjunto de *Baupläne*, como destacó Stephen Gould, entre otros. En este sentido, si unos científicos marcianos sofisticados llegaran a la Tierra, lo que verían probablemente sería, en efecto, un solo organismo, aunque aparentemente con muchas variaciones superficiales.

La uniformidad no pasó desapercibida en la época de Darwin. Los estudios naturalistas de Thomas Huxley, estrecho colaborador y comentarista de Darwin, le llevaron a observar, con cierta perplejidad, que al parecer existen «líneas predeterminadas de modificación» que hacen que la selección natural «produzca variedades de un número y tipo limitado» para cada especie (Maynard Smith *et al*., 1985: 266). En efecto, el estudio de las fuentes y la naturaleza de las variaciones posibles constituye una gran parte del propio programa de investigación de Darwin después de *El origen*, tal como se resume en su *Variation of Plants and Animals*

under Domestication (1868). La conclusión de Huxley es una reminiscencia de las ideas previas sobre «morfología racional», uno de cuyos conocidos ejemplos son las teorías de Goethe sobre la forma arquetípica de las plantas, que han sido retomadas parcialmente en la «revolución evo-devo». En efecto, como se ha indicado anteriormente, el propio Darwin se hizo eco de este problema y, como gran sintetizador que era, se ocupó con esmero de tales «leyes de crecimiento y forma»: las limitaciones y oportunidades de cambio se deben a los detalles de desarrollo, asociaciones casuales con otras características que pueden ser fuertemente seleccionadas a favor o en contra, y finalmente la selección del rasgo en sí. Darwin (1859: 12) indicó que dichas leyes de «correlación y equilibrio» serían de notable importancia para su teoría, señalando, por ejemplo, que «los gatos con ojos azules son invariablemente sordos».

Como hemos dicho en el capítulo 1, cuando la «Síntesis Moderna» evolutiva, con Fisher, Haldane y Wright a la cabeza, se impuso durante la mayor parte de la última mitad del siglo pasado, el foco de la teoría evolutiva se orientó hacia los acontecimientos micromutacionales y el gradualismo, resaltando el poder de la selección natural que opera mediante pasos incrementales muy pequeños. Sin embargo, más recientemente, en la biología general el péndulo se ha decantado hacia una combinación de los tres factores de Monod, lo que ha dado lugar a nuevas formas de entender las ideas tradicionales.

Volvamos a la primera de las dos preguntas básicas: ¿Por qué tiene que existir lengua alguna, al parecer una autoapomorfia? Como ya hemos dicho, la pregunta no se hubiera planteado hasta hace muy poco en el tiempo evolutivo: no existía ninguna lengua. Desde luego existían un montón de sistemas de comunicación animal. Pero todos ellos son radicalmente diferentes de la lengua humana en cuanto a estructura y en cuanto a función. El lenguaje humano ni

siquiera concuerda con las tipologías estándar de los sistemas de comunicación animal –los de Marc Hauser, por ejemplo, en su exhaustivo examen de la evolución de la comunicación (1997)–. Es una convención considerar que el lenguaje es un sistema cuya función es la comunicación. De hecho, esta es la visión generalizada que se expone en la mayoría de las explicaciones seleccionistas del lenguaje, que casi siempre parten de esta interpretación. Sin embargo, en la medida en que la caracterización tiene sentido, parece ser que esto es incorrecto, por una serie de razones a las que nos referiremos a continuación.

La inferencia del «propósito» o «función» de un rasgo biológico a partir de su forma superficial siempre está plagada de dificultades. Las observaciones de Lewontin en *The Triple Helix* (2001: 79) demuestran lo difícil que puede llegar a ser asignar una única función a un órgano o rasgo incluso en el caso de lo que a primera vista parece una situación mucho más simple: los huesos no tienen una «función» única e inequívoca. Si bien es cierto que los huesos sostienen el cuerpo, gracias a lo cual podemos levantamos y caminar, también son un almacén de calcio y médula ósea para fabricar nuevas células rojas sanguíneas, por lo que, en cierto sentido, forman parte del sistema circulatorio.

Lo que es cierto para los huesos lo es también para el lenguaje humano. Por otra parte, siempre ha habido una tradición alternativa, expresada por Burling (1993: 25), entre otros, según la cual puede ser que los seres humanos dispongan de un sistema de comunicación secundario como el de otros primates, concretamente un sistema gestual no verbal, o incluso de llamadas, pero esto no es lenguaje, puesto que, como Burling indica, «nuestro sistema de comunicación de primates que ha sobrevivido es marcadamente distinto del lenguaje».[14]

Qué duda cabe de que el lenguaje se puede utilizar para la comunicación, como cualquier otra cosa de las que hacemos:

nuestra forma de vestir, los gestos, etcétera. Y puede ser utilizado, y lo es en general, para mucho más. Estadísticamente hablando el mayor uso del lenguaje, con creces, es interno: para el pensamiento. Hace falta un enorme acto de voluntad para dejar de hablar con uno mismo mientras estamos despiertos, y también mientras dormimos, a menudo una buena lata. El destacado neurólogo Harry Jerison (1973: 55), entre otros, expresó una opinión más contundente, al sostener que «el lenguaje no evolucionó como un sistema de comunicación. […] La primera evolución del lenguaje es más probable que fuera […] para construir un mundo real», como «herramienta para la reflexión». No solamente en su dimensión funcional, sino también en todos los demás aspectos –semánticos, sintácticos, morfológicos y fonológicos–, las propiedades fundamentales del lenguaje humano parece que son marcadamente diferentes de las de los sistemas de comunicación de los animales, y sobre todo únicas en el mundo orgánico.

Entonces, ¿cómo apareció este extraño objeto en el registro biológico, al parecer dentro de una ventana sumamente estrecha de la evolución? No hay respuestas definitivas, desde luego, pero es posible esbozar lo que parecen ser especulaciones razonables, en estrecha relación con el trabajo de los últimos años en el ámbito biolingüístico.

Encontramos seres humanos anatómicamente modernos en el registro fósil de hace varios cientos de miles de años, pero la prueba de la capacidad humana es mucho más reciente, de poco antes de la larga excursión que partió de África. El paleoantropólogo Jan Tattersall (1998: 59) informa de que «un tracto vocal capaz de producir los sonidos del lenguaje articulado» existía más de medio millón de años antes de que hubiera prueba alguna de que nuestros antepasados utilizaran el lenguaje. «Tenemos que concluir– escribe– que la aparición del lenguaje y sus correlatos anatómicos no fue provocada por la selección natural, por muy beneficiosas que pueden parecer

estas innovaciones vistas en retrospectiva», una conclusión que no plantea problemas a la biología evolutiva estándar, en contra de las ilusiones de la literatura popular. Parece ser que el cerebro humano alcanzó el tamaño que tiene actualmente hace poco, pongamos unos 100.000 años, lo que sugiere a algunos especialistas que «el lenguaje humano evolucionó probablemente, por lo menos en parte, como consecuencia automática pero adaptativa del mayor tamaño absoluto del cerebro» (Striedter, 2004: 10). En el capítulo 1 señalamos algunas de las diferencias genómicas que pudieron provocar este aumento en el tamaño del cerebro, y otras se comentan en el capítulo 4.

Con respecto al lenguaje, Tattersall (2006: 72) escribe que «tras un período largo –y mal comprendido– de expansión cerebral errática y reorganización del linaje humano, ocurrió algo que preparó el terreno para la adquisición del lenguaje. Esta innovación habría dependido del fenómeno de la emergencia, conforme a la cual una combinación casual de elementos preexistentes da lugar a algo totalmente inesperado», presumiblemente «un cambio neuronal […] en alguna población del linaje humano […] más bien menor en términos genéticos, [que] probablemente no tenía nada que ver con la adaptación», si bien aportó ventajas y, luego, proliferó. Acaso fuera una consecuencia automática del tamaño absoluto del cerebro, como sugiere Striedter, o tal vez alguna mutación casual menor. Algún tiempo después –no mucho en tiempo evolutivo–, llegaron más innovaciones, quizás impulsadas culturalmente, que desembocaron en humanos con comportamiento moderno, la cristalización de la capacidad humana y la larga excursión desde África (Tattersall, 1998, 2002, 2006).

¿Cuál fue ese cambio neuronal que se produjo en algún grupo pequeño y que fue un cambio menor en términos genéticos? Para responder a esta pregunta, tenemos que considerar las especiales características del lenguaje. La propiedad más

elemental de nuestra compartida capacidad de lenguaje es que nos permite construir e interpretar una infinitud discreta de expresiones jerárquicamente estructuradas: discreta porque hay oraciones de cinco palabras y oraciones de seis palabras, pero no oraciones de cinco palabras y media; infinita porque no existe la oración más larga. El lenguaje, pues, se basa en un procedimiento recursivo generativo, que toma elementos elementales como la palabra de algún almacén, llamémosle lexicón, y se aplica repetidamente para producir expresiones estructuradas e ilimitadas. Para explicar la aparición de la facultad del lenguaje –por tanto, de la existencia de al menos una lengua– tenemos que asumir dos tareas fundamentales. Una de las tareas es dar cuenta de los «átomos computacionales», los elementos léxicos –normalmente entre 30.000 y 50.000–. La segunda es descubrir las propiedades computacionales de la facultad del lenguaje. Esta tarea, a su vez, tiene varias facetas: tenemos que procurar descubrir el procedimiento generativo que construye infinitamente muchas expresiones en la mente, y los métodos mediante los cuales dichos objetos mentales internos se relacionan con dos interfaces de sistemas externos al lenguaje (pero internos al organismo): el sistema de pensamiento, por una parte, y también el sistema sensoriomotor, que *externaliza* de este modo las computaciones internas y el pensamiento; en total, tres componentes, tal como hemos descrito en el capítulo 1. Esta es una manera de reformular la concepción tradicional, al menos hasta Aristóteles, de que el lenguaje es sonido con significado. Todas las tareas mencionadas plantean problemas muy arduos, mucho más de lo que se creía en el pasado reciente o, a menudo, hoy en día.

Volvamos, pues, a los elementos básicos del lenguaje, comenzando por el procedimiento generativo, que, según parece, surgió en algún momento hace unos 80.000 años, apenas un abrir y cerrar de ojos en la cronología evolutiva, y se supone que implicando un ligero recableado del cerebro. En este pun-

to, la revolución evo-devo en biología adquiere importancia. Ha logrado ofrecernos pruebas convincentes de dos conclusiones relevantes. Una es que la dotación genética incluso para los sistemas reguladores está profundamente conservada. La segunda es que cambios muy leves pueden dar lugar a grandes diferencias en el resultado observado, aunque la variación fenotípica es de todas maneras limitada, debido a la profunda conservación de los sistemas genéticos, y a leyes de la naturaleza de las que interesaron a Thompson y Turing. Por poner un ejemplo simple y bien conocido, hay dos clases de pez espinoso, con o sin punzantes espinas pélvicas. Hace unos 10.000 años, una mutación en un «interruptor» genético cercano a un gen implicado en la producción de espinas diferenció las dos variedades, una con espinas y la otra sin, una adaptada al mar y la otra, a los lagos (Colosimo *et al*., 2004, 2005; Orr, 200Sa).

Resultados mucho más trascendentales son los que tienen que ver con la evolución de los ojos, un tema muy estudiado, que hemos comentado con más detalle en el capítulo 1. Resulta que existen muy pocos tipos de ojos, en parte debido a las limitaciones impuestas por la física de la luz, en parte debido a que una sola categoría de proteínas, las moléculas de opsina, puede ejercer las funciones necesarias, y que los acontecimientos conducentes a su «captura» por células fueron aparentemente estocásticos en la naturaleza. Los genes que codifican la opsina tenían orígenes muy remotos, y son reclutados repetidamente, pero solo de un modo restringido, de nuevo debido a limitaciones físicas. Lo mismo es válido para las proteínas del cristalino. Como señalamos en el capítulo 1, la evolución de los ojos ilustra las complejas interacciones de las leyes físicas, los procesos estocásticos y el papel de la selección en la elección dentro de un estrecho canal físico de posibilidades (Gehring, 2005).

El trabajo que llevan a cabo Jacob y Monod desde 1961, sobre el descubrimiento del «operón» en *E. coli*, con el que

ganaron el Premio Nobel, dio lugar a la famosa cita de Monod (citado en Jacob, 1982: 290): «Lo que es cierto para el bacilo del colon [*E. coli*] es cierto para los elefantes». Aunque a veces esto se ha interpretado como una anticipación de la moderna explicación evo-devo, parece que lo que Monod quería decir realmente era que su teoría de la regulación negativa generalizada, teoría suya y de François Jacob, debía bastar para explicar todos los casos de la regulación de genes. Seguramente era una generalización exagerada. De hecho, a veces basta con mucho menos para la retroalimentación negativa, ya que un solo gen puede ser regulado negativamente o autorregulado. Además, ahora sabemos que existen mecanismos de regulación adicionales. En efecto, gran parte de la moderna revolución evo-devo se ocupa del descubrimiento de los métodos bastante más sofisticados de regulación génica y desarrollo empleados por las eucariotas. No obstante, la noción básica de Monod de que leves diferencias en la temporalización y disposición de los mecanismos reguladores que activan los genes pueden dar lugar a enormes diferencias al final ha resultado ser correcta, aunque la maquinaria no fue anticipada. Se le reservó a Jacob (1977: 26) la tarea de ofrecemos un modelo sugerente para el desarrollo de otros organismos, basado en la idea de que «gracias a los circuitos de regulación complejos» lo que «explica la diferencia entre una mariposa y un león, entre un pollo y una mosca […] es el resultado de mutaciones que alteraron los circuitos reguladores del organismo y no su estructura química». El modelo de Jacob, a su vez, inspiró directamente el enfoque del lenguaje de los «Principios y Parámetros» (P & P), un aspecto discutido en congresos al cabo de poco (Chomsky, 1980: 67).

El enfoque de P&P se basa en que las lenguas consisten en principios fijos e invariantes conectados a una especie de caja de distribución de parámetros, preguntas que el niño tiene que responder atendiendo a los datos que se le presentan con

el fin de fijar una lengua a partir de la variedad limitada de lenguas disponibles en principio; o, tal vez, como Charles Yang (2002) ha dicho, para determinar una distribución de probabilidad en las lenguas resultantes de un procedimiento de aprendizaje a fin de establecer los parámetros. Por ejemplo, el niño tiene que determinar si la lengua a la que está expuesto es de «núcleo inicial», como es el inglés, una lengua en la que el elemento nuclear va seguido de los complementos, por ejemplo en *leer libros*, o bien es de «núcleo final», como el japonés, donde sucede lo contrario, *hon-o yomimasu*, «libros leer». Al igual que en el caso en cierto modo análogo de reordenación de mecanismos reguladores, el enfoque presenta un marco para entender cómo la unidad esencial puede dar lugar a la aparición de la diversidad sin límites asumida no hace mucho tiempo por el lenguaje (así como por los organismos biológicos en general).

El programa de investigación de P& P ha sido muy fructífero: ha proporcionado una manera nueva y rica de entender una gama tipológica muy amplia de lenguas, ha planteado nuevas preguntas que nunca habían sido consideradas, algunas veces ha dado respuestas. No es exagerado decir que se ha aprendido más sobre las lenguas en los últimos veinticinco años que en los anteriores milenios con sus serias investigaciones sobre el lenguaje. En cuanto a las dos destacadas preguntas con las que hemos empezado, el enfoque sugiere que lo que surgió, bastante repentinamente en términos evolutivos, fue el procedimiento generativo que proporciona los principios, y que la diversidad del lenguaje deriva del hecho de que los principios no determinan las respuestas a todas las preguntas sobre el lenguaje, sino que dejan algunas preguntas como parámetros abiertos. Fijémonos en que el único ejemplo anterior tiene que ver con la ordenación. Aunque se discute sobre la materia, parece que por ahora existe evidencia lingüística sustancial de que la ordenación se limita a la exteriorización

de la computación interna del sistema sensoriomotor, y que no ejerce ningún papel en la sintaxis y la semántica centrales, una conclusión para la que también se acumula un tipo de pruebas biológicas conocidas para los biólogos tradicionales, a las que volveremos más adelante.

El supuesto más simple, y por ende el que adoptamos a menos que aparezca alguna prueba en su contra, es que el procedimiento generativo surgió súbitamente como resultado de una mutación menor. En ese caso, sería de esperar que el procedimiento generativo fuera muy sencillo. En los últimos cincuenta años se han explorado varios tipos de procedimientos generativos. Un enfoque conocido para los lingüistas e informáticos es la gramática de las estructuras oracionales, desarrollada en la década de 1950 y ampliamente utilizada desde entonces. En aquel momento, el enfoque tenía su lógica. Encajaba de manera muy natural en una de las varias formulaciones equivalentes de la teoría matemática de procedimientos recursivos –los sistemas de reescritura de Emil Post– y reflejaba al menos algunas propiedades básicas del lenguaje, como la estructura jerárquica y la incrustación. Sin embargo, no tardó en reconocerse que la gramática de la estructura oracional no solo es insuficiente para el lenguaje, sino que además es un procedimiento bastante complejo con muchas disposiciones arbitrarias, no precisamente el tipo de sistema que esperábamos encontrar, y cuya aparición era improbable que fuera repentina.

Con los años, la investigación ha encontrado maneras de disminuir la complejidad de estos sistemas, y, finalmente, eliminarlos completamente en favor del modo más simple posible de generación recursiva: una operación que toma dos objetos ya construidos, llamémoslos *X* e *Y*, y forma a partir de ellos un nuevo objeto, que consiste en aquellos dos sin cambios, por tanto, sencillamente un conjunto con dos miembros, *X* e *Y*. A esta operación óptima la llamamos Ensamble.

Provista de átomos conceptuales del léxico, la operación Ensamble, repetida ilimitadamente, produce una infinidad de expresiones digitales y estructuradas jerárquicamente. Si dichas expresiones pueden ser interpretadas sistemáticamente en la interfaz con el sistema conceptual, ello proporciona un «lenguaje de pensamiento» interno.

Una tesis muy sólida, llamada tesis minimalista fuerte (TMF), es que el proceso generativo es óptimo: los principios del lenguaje están determinados por una computación eficiente y el lenguaje se ciñe a la operación recursiva más simple diseñada para satisfacer las condiciones de la interfaz de acuerdo con los principios independientes de la computación eficiente. En este sentido, el lenguaje es algo parecido a un copo de nieve, que adopta su forma concreta, en virtud de las leyes de la naturaleza –en este caso, los principios de eficiencia computacional–, una vez que el modo básico de construcción está disponible, y cumpliendo las condiciones impuestas en las interfaces. La tesis básica se expresa en el título de una colección de ensayos técnicos: *Interfaces* + *Recursion* = *Language*? (Sauerland y Gartner, 2007). De forma óptima, la recursividad puede reducirse al Ensamble. El signo de interrogación en el título es, por supuesto, muy apropiado: las preguntas surgen en la frontera de las investigaciones actuales. Un poco más adelante sugerimos que existe una asimetría significativa entre las dos interfaces, y que la interfaz «semántico-pragmática» –el enlace con los sistemas de pensamiento y acción– tiene primacía. En qué medida pueden ser ricas estas condiciones externas es también un aspecto controvertido de investigación, y arduo, puesto que no hay muchas pruebas sobre estos sistemas de pensamiento-acción que son independientes del lenguaje. Una tesis muy sólida, sugerida por Wolfram Hinzen (2006), es que los componentes centrales del pensamiento, tales como las proposiciones, se derivan básicamente del procedimiento generativo construido

de manera óptima. Si estas ideas pudiesen ser afinadas y validadas, el efecto de la interfaz semántico-pragmática en el diseño del lenguaje se reduciría proporcionalmente.

La TMF dista mucho de estar establecida, pero hoy se ve mucho más plausible de lo que parecía hace solo unos pocos años. En la medida en que sea correcta, la evolución del lenguaje se reducirá a la aparición del Ensamble, la evolución de átomos conceptuales del lexicón, el enlace con los sistemas conceptuales y el modo de exteriorización. Cualquier residuo de principios del lenguaje no reducibles al Ensamble y a la computación óptima deberán ser explicados por algún otro proceso evolutivo, un proceso del que probablemente sabemos poco, por lo menos mediante los métodos que han sido conocidos hasta ahora, como indica Lewontin (1998).

Tengamos en cuenta que en este cuadro no hay espacio para ningún precursor del lenguaje –por ejemplo, un sistema de tipo lenguaje solo con frases cortas–. No hay ninguna razón para postular un sistema de este tipo: para pasar de oraciones de siete palabras a la infinitud discreta del lenguaje humano tiene que aparecer el mismo procedimiento recursivo que para pasar de cero a infinito, y, por supuesto, no hay pruebas directas de tales «protolenguajes». Observaciones parecidas se aplican a la adquisición del lenguaje, a pesar de las apariencias, una cuestión que ahora dejamos a un lado.

Es crucial saber que el Ensamble también produce sin más estipulación la conocida propiedad del *desplazamiento* propia del lenguaje: el hecho de que pronunciemos oraciones en una sola posición, pero que las interpretemos semánticamente en otra posición. Así, en la frase *Adivina qué come John*, entendemos que *qué* es el objeto de *come*, como en *John come una manzana*, a pesar de que se pronuncia en otra posición. Esta propiedad siempre se ha visto como algo paradójico, una especie de «imperfección» del lenguaje. No es necesaria en absoluto para reflejar hechos semánticos, pero es

ubicua. Supera la capacidad de las gramáticas de estructuras oracionales, y requiere que estas todavía se compliquen más con dispositivos adicionales. Pero cae dentro de la TMF, automáticamente.

Para ver cómo, supongamos que la operación de Ensamble ha construido la expresión mental correspondiente a *John come qué*. Dados dos objetos sintácticos *X*, *Y*, el Ensamble puede construir una expresión más larga solo de dos formas lógicas posibles: o bien *X* e *Y* están disociados, o bien uno forma parte del otro. En el primer caso hablamos de Ensamble Externo (EE), y en el otro, de Ensamble Interno (El). Si tenemos *Y* = la expresión correspondiente a *qué*, *y X*= la expresión correspondiente a *John come qué*, entonces *Y* es una parte de *X* (un subconjunto de *X*, o un subconjunto de un subconjunto de *X*, etc.), y, a continuación el EI puede añadir algo desde dentro de la expresión, con el *output* de Ensamble, donde la mayor estructura corresponderá a *qué come John qué*. En el siguiente paso de derivación, supongamos que tenemos *Y* = algo nuevo, como *adivina*. Entonces *X* = *qué come John qué* e *Y*= *adivina*, y *X* e *Y* están disociados. Por tanto, se aplica el Ensamble Externo, y produce *adivina qué come John*.

Con esto recorremos una parte del camino hacia el desplazamiento. En *qué come John qué*, el sintagma qué aparece en dos posiciones, y de hecho ambas son necesarias para la interpretación semántica: la posición original nos da la información de que *qué* se entiende que es el objeto directo de *come*, y la nueva posición, inicial, se interpreta como un cuantificador que abarca una variable, de modo que la frase significa algo así como «para qué cosa *x*, John come la cosa *x*».

Estas observaciones generalizan una amplia gama de construcciones. Los resultados son exactamente lo que se necesita para la interpretación semántica, pero no producen los objetos que se dicen en inglés. No decimos *adivina qué John come qué*, sino *adivina qué come John*, suprimiendo

la posición original. Se trata de la propiedad universal de desplazamiento, con restricciones menores (e interesantes) que ahora podemos pasar por alto. Dicha propiedad es el resultado de los principios elementales de la eficiencia computacional. De hecho, a menudo se ha observado que la actividad motora en serie es computacionalmente costosa, un aspecto demostrado por la gran cantidad de corteza motora dedicada tanto al control motor de las manos como a los gestos articulatorios orofaciales.

Para exteriorizar la expresión generada internamente *qué come John qué*, sería necesario decir *qué* dos veces, lo cual significa poner una carga muy considerable en la computación, teniendo en cuenta expresiones de complejidad normal y la naturaleza real de desplazamiento mediante el Ensamble Interno. Suprimiendo todas las ocurrencias de *qué* menos una, la carga computacional se facilita enormemente. La ocurrencia que se dice es la más destacada, la última creada mediante Ensamble Interno: de lo contrario, no habrá ninguna indicación de que la operación se ha aplicado para producir la interpretación correcta. Parece, pues, que la facultad del lenguaje recluta un principio general de eficiencia computacional para el proceso de exteriorización.

La supresión de todas menos una de las ocurrencias del elemento desplazado es computacionalmente eficiente, pero impone una carga significativa sobre la interpretación y, por tanto, sobre la comunicación. La persona que escucha la frase tiene que descubrir la posición del espacio en el que el elemento desplazado ha de ser interpretado semánticamente. Es un problema conocido en los programas de análisis estructural, que en general no tiene nada de trivial. Hay, pues, un conflicto entre eficiencia computacional y eficiencia interpretativa-comunicativa. Universalmente, las lenguas resuelven el conflicto a favor de la eficiencia computacional. Estos hechos sugieren de inmediato que el lenguaje evolu-

cionó como un instrumento del pensamiento interno, con la exteriorización como proceso secundario. Existe una gran cantidad de pruebas procedentes del diseño de lenguaje que llega a conclusiones parecidas: por ejemplo, las llamadas propiedades de isla.

Hay razones independientes que respaldan la conclusión de que la exteriorización es un proceso secundario. Una es que la externalización parece que es independiente de la modalidad, como se sabe a partir de estudios del lenguaje de signos. Las propiedades estructurales del lenguaje de signos y del lenguaje hablado son notablemente parecidas. Además, la adquisición sigue el mismo curso en ambos, y la localización neuronal también es similar, todo lo cual tiende a reforzar la conclusión de que el lenguaje está optimizado para el sistema de pensamiento, con un modo de externalización secundario.

Téngase en cuenta, además, que las restricciones a la externalización que valen para la modalidad auditiva también valen para el caso de la modalidad visual en los lenguajes de signos. A pesar de que no exista ninguna limitación física que nos impida «decir» con una mano que *a John le gusta el helado* y con la otra que *a María le gusta la cerveza*, aun así parece ser que una mano es completamente dominante y produce oraciones (a través de gestos) en un orden de izquierda a derecha en el tiempo, linealizado como en la externalización del tracto vocal, y que la mano no dominante añade marcas enfáticas, morfológicas y similares.

En efecto, parece posible hacer una afirmación mucho más contundente: toda la investigación reciente y relevante en biología y evolución lleva a la conclusión de que el proceso de externalización es secundario. Estas investigaciones incluyen los recientes descubrimientos, y muy publicitados, de elementos genéticos supuestamente implicados en el lenguaje, concretamente *FOXP2*, el gen regulador (factor de transcripción). *FOXP2* está implicado en un defecto del lenguaje altamente

heredable, la llamada dispraxia verbal. Desde este descubrimiento, el gen *FOXP2* ha sido meticulosamente analizado desde un punto de vista evolutivo. Sabemos que existen dos pequeñas diferencias en los aminoácidos entre la proteína para la que codifica el *FOXP2* humano y la de otros primates y mamíferos no humanos. Los cambios correspondientes en *FOXP2* se han planteado como objetivos de la reciente selección natural positiva, tal vez concomitante con la aparición del lenguaje (Fisher *et al*., 1998; Enard *et al*., 2002). Según parece, el *FOXP2* humano, neandertal y denisovano es idéntico, al menos en relación a las dos regiones que originalmente se cree que están bajo selección positiva, y esto puede que nos diga algo acerca del momento en que apareció el lenguaje, o al menos acerca de sus prerrequisitos genómicos (Krause *et al*., 2007). No obstante, dicha conclusión sigue siendo una cuestión debatida, como se ha dicho en los capítulos 1 y 4.

También podemos preguntamos si este gen tiene una implicación central en el lenguaje o, como ahora nos parece más plausible, si forma parte del proceso de exteriorización secundario. Los descubrimientos en pájaros y ratones que han tenido lugar en los últimos años apuntan a un «emergente consenso» acerca de que este factor de transcripción no es tanto parte de un proyecto para la sintaxis interna, la estrecha facultad del lenguaje, y casi seguro que no es un hipotético «gen del lenguaje» (igual que no hay un solo gen del color de los ojos o del autismo), sino más bien parte de la maquinaria reguladora relacionada con la exteriorización (Vargha-Khadem *et al*., 2005;. Groszer *et al*., 2008). El *FOXP2* ayuda en el desarrollo del control de la motricidad fina serial, sea orofacial u otra: la capacidad de poner literalmente un «sonido» o «gesto» en su sitio, en un momento detrás de otro en el tiempo.

A este respecto, vale la pena señalar que los miembros de la familia KE, en la que este defecto genético se aisló originalmente, muestran una dispraxia motora bastante general,

que no solo está localizada en los movimientos orofaciales. Estudios recientes, en los que un gen *FOXP2* mutado, construido para replicar los defectos encontrados en la familia KE se insertó en ratones, confirman esta visión: «Encontramos que los ratones heterozigotos con Foxp2-R552H presentan déficits sutiles pero muy significativos en el aprendizaje de habilidades motoras rápidas. […] Estos datos son coherentes con las propuestas de que las facultades del habla humana reclutan circuitos neuronales evolutivamente antiguos implicados en el aprendizaje motor» (Groszer *et al*., 2008: 359).

En el capítulo 1 también examinábamos pruebas recientes relativas a ratones transgénicos que sugieren que la alteración en el desarrollo neuronal asociada con *FOXP2* podría estar implicada en la transferencia de conocimientos de la memoria declarativa a la memoria procedimental (Schreiweis *et al*., 2014). Esto vuelve a encajar con la visión del aprendizaje motor de serialización, pero todavía no podemos decir que sea lenguaje humano *tout court* [en cursiva en el original]. Si este punto de vista va bien encaminado, entonces el *FOXP2* se parece más al programa que ayuda a construir un sistema de entrada y salida que funcione correctamente para un ordenador, como la impresora, que a la construcción del propio procesador central del ordenador. Desde este punto de vista, lo que ha ocurrido en los miembros afectados de la familia KE es, pues, un fallo en el sistema de exteriorización, en la «impresora», no en la facultad del lenguaje propiamente dicha. Si es así, entonces los análisis evolutivos que sugieren que este factor de transcripción estaba bajo la selección positiva hace aproximadamente 100.000-200.000 años, en realidad, pudieran ser bastante poco concluyentes en relación a la evolución de los componentes básicos de la facultad del lenguaje: la sintaxis y la aplicación a la interfaz «semántica» (conceptual-intencional). Es difícil determinar la secuencia causal: el vínculo entre el *FOXP2* y el alto grado de

coordinación motora serial podría ser considerado, bien como un sustrato oportunista necesario para la exteriorización, no importa de qué modalidad, como es común en los escenarios evolutivos, o bien como el resultado de la presión selectiva para «soluciones» eficientes de exteriorización después de que apareciera el Ensamble. En cualquiera de los casos, *FOXP2* se convierte en parte de un sistema extrínseco del núcleo de la sintaxis/semántica.

Michael Coen (2006; comunicación personal) nos ofrece más pruebas con relación a la coordinación serial en la vocalización que sugieren que el control motor serial discretizado podría ser solamente un sustrato común a todos los mamíferos, y, posiblemente, a todos los vertebrados. Si es así, toda la historia del *FOXP2*, y la exteriorización motora en general, aún se apartan más del cuadro de la evolución del núcleo de la sintaxis/semántica. La prueba proviene del hallazgo de que todos los mamíferos sometidos a pruebas (personas, perros, gatos, focas, ballenas, babuinos, tamarinos, ratones) y vertebrados no relacionados (cuervos, pinzones, ranas, etc.) poseen lo que antes se atribuyó solo al sistema de exteriorización humano: cada uno de los repertorios vocales de las especies mencionadas se extrae de un conjunto *finito* de fonemas «distintivos» (o, para ser más precisos, «cantemas» en el caso de las aves», «ladremas» en el de los perros, etc.). La hipótesis de Coen es que cada especie tiene un número finito de producciones articulatorias (por ejemplo, fonemas) genéticamente limitadas por su fisiología, de acuerdo con principios como la minimización de energía durante la vocalización, limitaciones físicas y otros principios. Este cuadro se parece al de Kenneth Stevens respecto a la naturaleza cuántica de la producción del habla (Stevens, 1972: 1989).

Según este punto de vista, cada una de las especies utiliza un subconjunto de sonidos primitivos específicos de la especie para generar las vocalizaciones comunes de dicha

especie. (No es de esperar que cada animal los utilice todos, de la misma manera que ningún ser humano emplea todos los fonemas). Si es así, nuestro hipotético marciano llegaría a la conclusión de que incluso en el nivel de exteriorización periférica, existe un lenguaje humano, un lenguaje de los perros, un lenguaje de las ranas, etcétera. Como se ha señalado en el capítulo 1, parece que la afirmación de Caen ha sido confirmada experimentalmente, al menos con relación a una especie de pájaros, por Comins y Gentner (2015).

En resumen, hasta el momento la mayor parte de las pruebas nos sugieren que *FOXP2* no nos dice nada de la facultad central del lenguaje humano, desde un punto de vista explicativo, lo cual hace improbable el caso, por ejemplo, de la anemia de las células falciformes, en la que un defecto genético lleva directamente al rasgo anormal, la formación de una proteína anormal de la hemoglobina y la consiguiente distorsión celular de los glóbulos rojos. Si todo esto es así, la explicación «del» fenotipo central del lenguaje puede ser aún más indirecta y difícil de lo que Lewontin (1998) ha esbozado.[15]

De hecho, en muchos aspectos, este enfoque sobre el *FOXP2* y la dispraxia es muy parecido al enfoque casi universal del «lenguaje como comunicación».[16] Ambos examinan las propiedades aparentemente particulares solo del proceso de exteriorización, que, conjeturamos, no forma parte de la facultad central del lenguaje humano. En este sentido, los dos enfoques están mal orientados, nada nos revelan de la computación interna de mente/cerebro. Exponiendo expresamente la distinción entre sintaxis interna y exteriorización, se abren múltiples y nuevas direcciones de investigación, y se plantean nuevas predicciones, concretas y comprobables, especialmente desde una perspectiva biológica, como el ejemplo ilustrado por las producciones vocales animales.

Volviendo a los principios básicos del lenguaje, una operación ilimitada del Ensamble –y por ende del desplazamien-

to– pudo surgir a partir de algo tan sencillo como un ligero recableado del cerebro, acaso solo una mínima extensión del «cableado» cortical existente, como se muestra en las figuras del capítulo 4. De hecho, este tipo de cambio está muy cerca de la visión expuesta por Ramus y Fisher (2009: 865):

> Incluso si [el lenguaje] es verdaderamente nuevo en un sentido cognitivo, es probable que sea mucho menos nuevo en términos biológicos. Por ejemplo, un cambio en un solo gen productor de una molécula de señalización (o un receptor, canal, etc.) puede llevar a la creación de nuevas conexiones entre dos regiones cerebrales ya existentes. Incluso una región cerebral totalmente nueva podría evolucionar con relativa simplicidad teniendo un factor de transcripción modificado prenatalmente que definiera nuevos límites en el córtex, que empujara regiones previamente existentes y creara las condiciones moleculares para una nueva forma de córtex en el sentido de Brodmann: siguen las seis capas básicas, pero con una importancia relativa diferente, diferentes patrones de conectividad interna y externa, y diferentes distribuciones de tipos de neuronas en las capas. Esta sería esencialmente una nueva variación cuantitativa dentro de un plan de construcción muy general, que requeriría pocas cosas nuevas en términos de material genético, pero esta área, sin embargo, podría presentar propiedades nuevas de entrada/salida que, junto con las adecuadas conexiones de entrada/salida, podrían llevar a cabo un procesamiento de información completamente nueva de gran importancia para el lenguaje.

Como rasgo innovador, primero aparecería solo en un pequeño número de copias, como se ha dicho en el capítulo 1. Los individuos así dotados habrían tenido muchas ventajas: capacidad para pensamiento complejo, planificación, interpretación, etcétera. La capacidad presumiblemente sería transmitida en parte a los descendientes, y debido a las ventajas selectivas

que confiere, podría llegar a dominar un pequeño grupo reproductivo. Sin embargo, debe recordarse lo dicho en el capítulo 1 en cuanto a la restricción que afecta a toda mutación o rasgo nuevo, que es el problema de cómo un número de copias de dicha variante que al principio es pequeño puede esquivar la pérdida estocástica, a pesar de la ventaja selectiva.

Al propagarse este rasgo ventajoso entre la población, habría una ventaja para la exteriorización, por lo que la capacidad se vincularía, como proceso secundario, al sistema sensoriomotor de la exteriorización y la interacción, incluida la comunicación como un caso especial. No es fácil imaginar una explicación de la evolución humana que no suponga por lo menos lo dicho hasta ahora, de una u otra forma. Cualquier hipótesis adicional requiere tanto pruebas como lógica, lo cual no es fácil de conseguir.

La mayoría de las alternativas, de hecho, postulan supuestos adicionales, basados en el punto de vista de la «lengua-como-comunicación», presumiblemente relacionados con la exteriorización, como hemos visto. En uno de sus trabajos Számado y Szathmáry (2006) hacen una lista de lo que consideran que son las principales teorías alternativas que explican la aparición del lenguaje humano; la lista incluye: 1) el lenguaje como cotilleo; 2) el lenguaje como higiene social; 3) el lenguaje como consecuencia de la caza cooperativa; 4) el lenguaje como resultado del «motherese» [la forma de hablar a los bebés]; 5) la selección sexual; 6) el lenguaje como condición para el intercambio de información de estado; 7) el lenguaje como canción; 8) el lenguaje como requisito para la fabricación de herramientas o resultado de la fabricación de herramientas; 9) el lenguaje como consecuencia de los sistemas gestuales; 10) el lenguaje como dispositivo maquiavélico para engañar, y, por último, 11) el lenguaje como «herramienta mental interna».

Téngase en cuenta que la última teoría, el lenguaje como herramienta mental interna, es la única que no supone, explí-

cita o implícitamente, que la principal función del lenguaje sea la comunicación externa. Pero esto nos lleva a una especie de paradoja adaptativa, puesto que entonces las señales de los animales deberían ser suficientes, el mismo problema que señaló Wallace. Számado y Szathmáry (2006: 679) dicen: «La mayoría de las teorías no tienen en cuenta el tipo de fuerzas selectivas que podrían fomentar el uso de la comunicación convencional en un determinado contexto en lugar del uso de las "tradicionales" señales de los animales. […] Por tanto, no existe una teoría que demuestre de manera convincente una situación en la que fuera necesario un medio complejo de comunicación simbólica en lugar de los sistemas de comunicación simples existentes». Además señalan que la teoría de la lengua-como-herramienta-mental no sufre este defecto. Sin embargo, estos autores, al igual que la mayoría de investigadores en este campo, no parece que hagan la inferencia obvia, sino que siguen centrándose en la exteriorización y la comunicación.

Eminentes biólogos de la evolución también han presentado propuestas en cuanto a la primacía del lenguaje interno –similares a la observación de Harry Jerison, ya señalada, de que el lenguaje es una «herramienta interna»–. En un congreso internacional sobre biolingüística que tuvo lugar en 1974, el premio Nobel Salvador Luria (1974) se mostró el más firme defensor de la opinión de que las necesidades comunicativas no habrían ejercido «una fuerte presión selectiva para producir un sistema como el lenguaje», con su relación crucial con el «desarrollo del pensamiento abstracto o productivo». François Jacob (1982: 58) retomó esta misma idea y sugirió que «el papel de la lengua como sistema de comunicación entre individuos se habría dado solo secundariamente. […] Lo que hace único al lenguaje no parece que sea en absoluto su papel en la comunicación de directrices para la acción» u otras características comunes de la comunicación animal,

sino «su papel en la simbolización, en la evocación de imágenes cognitivas», en la configuración de nuestra noción de la realidad y en la producción de nuestra capacidad para el pensamiento y la planificación, mediante su propiedad única de permitir «infinitas combinaciones de símbolos» y, por tanto, la «creación mental de mundos posibles». Estas ideas se remontan a la revolución cognitiva del siglo XVII, que en muchos aspectos prefigura desarrollos que se produjeron a partir de la década de 1950.

Sin embargo, podemos ir más allá de la especulación. La investigación del diseño del lenguaje puede ofrecernos pruebas de la relación del lenguaje con el sistema sensoriomotor y el sistema de pensamiento. Como se ha dicho, creemos que cada vez hay más pruebas que respaldan la conclusión natural de que la relación es asimétrica, tal como ilustra el caso crítico del desplazamiento comentado. La exteriorización no tiene nada de sencilla. Tiene que poner en relación dos sistemas muy distintos: uno es un sistema sensoriomotor que todo hace pensar que ha permanecido básicamente intacto durante cientos de miles de años; el otro es un sistema computacional de pensamiento aparecido recientemente, lo cual es perfecto, siempre que la tesis minimalista fuerte sea correcta. Así, sería de esperar que la morfología y la fonología –los procesos lingüísticos que convierten los objetos sintácticos internos en entidades accesibles al sistema sensoriomotor– resultasen ser bastante complejas, variadas y sujetas a acontecimientos históricos accidentales. Entonces la parametrización y la diversidad estarían en su mayor parte –posiblemente en su totalidad– restringidas a la exteriorización. Eso es más o menos lo que encontramos: un sistema computacional que genera eficientemente expresiones interpretables en la interfaz semántica/pragmática, con una diversidad resultante de modos complejos y sumamente variados de exteriorización, que, además, son fácilmente susceptibles al cambio histórico.[17]

Si esta descripción es más o menos precisa, quizás tengamos una respuesta para la segunda de las dos preguntas básicas planteadas al principio de este capítulo: ¿Por qué existen tantas lenguas? La razón podría ser que el problema de la exteriorización puede resolverse de muchas maneras diferentes e independientes, ya sea antes o después de la dispersión de la población original. No tenemos ninguna razón para suponer que la solución del problema de la exteriorización exija un cambio evolutivo, es decir, un cambio genómico. Podría ser sencillamente un problema del que se ocupen procesos cognitivos ya existentes, de diferentes maneras y en diferentes momentos. A veces se da una desafortunada tendencia a confundir el cambio evolutivo (genómico) literal con el cambio histórico, dos fenómenos totalmente distintos. Como ya se ha señalado, existen pruebas sólidas de que no ha habido una evolución relevante de la facultad del lenguaje desde el éxodo de África, hace unos 60.000 años, aunque, sin duda, ha habido una gran cantidad de cambios, incluso invención de modos de exteriorización (como en el lenguaje de signos). La confusión acerca de estos aspectos podría superarse sustituyendo las nociones metafóricas de «evolución del lenguaje» y «cambio en el lenguaje» por sus equivalentes más exactos: evolución de los organismos que utilizan el lenguaje, y cambio en las maneras de hacerlo. En estos términos más precisos, la evolución participó en la aparición de la facultad del lenguaje, mientras que el cambio histórico (que continúa constantemente), no.

Una vez más, estos parecen ser los supuestos más simples, y no hay razón conocida para rechazarlos. Si, en general, van bien encaminados, se deduce de ello que la exteriorización quizá no haya evolucionado en absoluto; más bien pudo haber sido un proceso de resolución del problema utilizando las capacidades cognitivas existentes que tienen otros animales. La evolución en el sentido biológico del término se habría

limitado, pues, a los cambios que dieron lugar al Ensamble y la facultad básica, junto con el residuo que se resista a la explicación en términos de la tesis minimalista fuerte y toda restricción específica del lenguaje que pudiera existir en la solución al problema cognitivo de la exteriorización. En consecuencia, cualquier aproximación a la «evolución del lenguaje» que se centre en la comunicación, o en el sistema sensoriomotor, o en propiedades estadísticas de la lengua oral, etcétera, puede ser tremendamente errónea. Esta opinión se refiere a una amplia gama, como sabrán los que estén familiarizados con la literatura.

Volviendo a las dos destacadas preguntas iniciales, tenemos por lo menos algunas sugerencias –nos parece que razonables– respecto a cómo es que existe como mínimo una lengua, y por qué las lenguas presentan variaciones tan amplias; esto último en parte una ilusión, bastante parecida a la aparente ilimitada variedad de organismos, todos ellos basados en elementos profundamente conservados con resultados fenoménicos limitados por las leyes de la naturaleza (en el caso del lenguaje, la eficiencia computacional).

Otros factores pueden tener una gran influencia en el diseño del lenguaje –en particular, propiedades del cerebro, en absoluto desconocidas– y hay sin duda mucho más que decir, incluso sobre los temas a los que nos hemos referido aquí. Pero en lugar de indagar en estas preguntas, volvamos brevemente a los elementos léxicos, los átomos conceptuales del pensamiento y su última exteriorización en diversas formas.

En otros primates hallamos estructuras conceptuales: probablemente esquemas actor-acción-meta, categorización, seguramente la distinción singular-plural, y otras. Estas fueron presumiblemente reclutadas para el lenguaje, aunque los recursos conceptuales de los seres humanos que entran en el uso del lenguaje son mucho más ricos. Concretamente,

incluso los «átomos» de computación, elementos léxicos/conceptos, parece que son exclusivamente humanos.

Un aspecto crucial es que, incluso las palabras y los conceptos más simples del lenguaje y el pensamiento humanos, carecen de la relación con entidades independientes de la mente que parecen ser características de la comunicación de los animales. Esta última se realiza basándose en una relación de uno a uno entre los procesos mente/cerebro y «un aspecto del entorno al que se adaptan estos procesos del comportamiento de los animales», por citar a Randy Gallistel (1990: 1-2), neurocientífico cognitivo que presenta una importante colección de artículos sobre la cognición animal. De acuerdo con Jane Goodall (1986: 125), la persona que ha observado más de cerca a los chimpancés en estado salvaje, para estos animales «la producción de un sonido en ausencia del estado emocional apropiado parece ser una tarea casi imposible».

Los símbolos del lenguaje y el pensamiento humanos son notoriamente diferentes. Su uso no atiende automáticamente a los estados emocionales, y no escoge objetos o acontecimientos independientes de la mente en el mundo externo. Para el lenguaje y el pensamiento humanos, según parece, no hay relación de *referencia* en el sentido de Frege, Peirce, Tarski, Quine, y la filosofía contemporánea del lenguaje y la mente. Lo que entendemos por un río, una persona, un árbol, el agua, y así sucesivamente, resulta ser regularmente una creación de lo que los investigadores del siglo XVII llamaron «facultades cognoscitivas» humanas, que nos proporcionan ricos medios para referirnos al mundo exterior partiendo de intrincadas perspectivas. Tal como lo expresa el influyente neoplatonista Ralph Cudworth (1731: 267), solo mediante las «ideas hacia adentro» producidas por su propio «poder cognoscitivo innato» la mente puede «saber y entender todas las cosas individuales externas», articulando ideas que influyeron en Kant. Los objetos de pensamiento construidos por los poderes

cognoscitivos no pueden ser reducidos a «una naturaleza peculiar perteneciente» a la cosa de la que estamos hablando, tal como resumió David Hume en un siglo de investigación. En este sentido, los símbolos conceptuales internos son como las unidades fonéticas de las representaciones mentales, como la sílaba [ba]; cada acto particular que exterioriza este objeto mental resulta en una entidad independiente de la mente, pero es inútil buscar un constructor independiente de la mente que corresponda a la sílaba. La comunicación no consiste en producir una entidad externa a la mente que el oyente escoge del mundo, como haría un físico. No, la comunicación es más o menos un asunto en el que el hablante produce acontecimientos externos y los oyentes tratan de encajarlos lo mejor que pueden a sus propios recursos internos. En este sentido, las palabras y los conceptos se parecen, incluso los más simples. La comunicación se basa en capacidades cognoscitivas compartidas, y logran resultados en la medida en que la compartición de construcciones mentales, antecedentes, intereses, presuposiciones, etcétera, permite que se alcancen (más o menos) perspectivas comunes. Estas propiedades de los elementos léxicos parecen ser específicas del lenguaje y el pensamiento humanos y han de explicarse de alguna manera al estudiar su evolución. Cómo, nadie tiene ni idea. El hecho de que exista siquiera un problema apenas se ha reconocido, como resultado del poderoso enraizamiento de las doctrinas del referencialismo, según el cual existe una relación «palabra-objeto», en la que los objetos son extramentales.

Las capacidades cognoscitivas humanas nos ofrecen un mundo de experiencia, diferente del mundo de la experiencia de otros animales. Por ser criaturas que reflexionan, gracias a la aparición de la facultad humana, los seres humanos tratan de dar algún sentido a la experiencia. A este esfuerzo se le llama mito, religión o magia, o filosofía, o, en inglés moderno, ciencia. Para la ciencia, el concepto de referencia en el sentido

técnico es un ideal normativo: esperamos que los conceptos inventados de *fotón* o de *oración predicativa* escojan algo real del mundo. Y desde luego el concepto de referencia está muy bien para el contexto para el que fue inventado en la lógica moderna: sistemas formales, en los que la relación de *referencia* se establece, por ejemplo, entre numerales y números. Pero el lenguaje y el pensamiento humanos no funcionan de este modo, y el no reconocer este hecho se ha traducido en una confusión sin límites.

Entramos aquí en grandes temas, extremadamente interesantes, que vamos a tener que dejar apartados. Permitidnos solo resumir brevemente lo que parece ser la mejor conjetura actual sobre la unidad y la diversidad del lenguaje y el pensamiento. Por caminos que nos son completamente desconocidos, nuestros antepasados desarrollaron conceptos humanos. En algún momento de un pasado muy reciente, al parecer un poco antes de hace 80.000 años, a juzgar por representantes simbólicos asociados, individuos de un pequeño grupo de homínidos en el África oriental experimentaron un cambio biológico menor que dio lugar a la operación del Ensamble, una operación que toma conceptos humanos como átomos computacionales y produce expresiones estructuradas, que, interpretadas sistemáticamente mediante el sistema conceptual, proporcionan un rico lenguaje de pensamiento. Estos procesos pueden ser computacionalmente perfectos, o casi perfectos, de ahí el resultado de las leyes físicas independientes de los seres humanos. La innovación comportó ventajas obvias y se quedó dominando en el pequeño grupo. En una etapa posterior, el lenguaje interno del pensamiento se conectó al sistema sensoriomotor, una tarea compleja que puede resolverse de muchas maneras diferentes y en diferentes momentos. En el curso de todos estos acontecimientos, la capacidad humana tomó forma, y dio lugar a buena parte de nuestra «naturaleza moral e intelectual», en palabras de Wallace. Los resultados

parecen ser sumamente diversos, pero tienen una unidad esencial, que refleja el hecho de que los seres humanos son, en aspectos fundamentales, idénticos, en el mismo sentido que nuestro hipotético científico extraterrestre evocado anteriormente podría concluir que solo hay un lenguaje con variaciones dialectales menores, principalmente –tal vez completamente– en modo de exteriorización.

Para finalizar, recordemos que incluso si esta historia general acaba siendo más o menos válida, y los enormes vacíos acaban llenándose, seguirán aún sin resolver problemas planteados desde hace cientos de años. Entre ellos está la cuestión de cómo las propiedades «llamadas mentales» se relacionan con «la estructura orgánica del cerebro», según la formulación del siglo XVII, y los problemas aún más misteriosos del uso ordinario, creativo y coherente, del lenguaje, una de las preocupaciones fundamentales de la ciencia cartesiana, que hoy apenas si asoma en el horizonte de la investigación.

3. LA ARQUITECTURA DEL LENGUAJE Y SU IMPORTANCIA PARA LA EVOLUCIÓN

Es evidente que la indagación racional en la evolución de un sistema solo puede proseguir en la medida en que se entienda su naturaleza. No es menos evidente que, sin una comprensión seria de la naturaleza fundamental de un sistema, sus manifestaciones se nos aparecerán caóticas, sumamente variables y carentes de propiedades generales. Y, en consecuencia, el estudio de su evolución no se podrá llevar a cabo con seriedad. Desde luego, dicha investigación debe también ser lo más fiel posible a lo que se conoce de la historia evolutiva. Estas obviedades valen para el estudio de la facultad del lenguaje humano al igual que para otros sistemas biológicos. Las propuestas que recoge la literatura se pueden evaluar teniendo en cuenta lo bien que atiendan a tales restricciones elementales.

El problema de la evolución del lenguaje surgió en la segunda mitad del siglo xx, en cuanto se dieron los primeros pasos en la construcción de explicaciones del lenguaje como objeto biológico, interno al individuo, que reflejaran

lo que podemos llamar la «propiedad básica» del lenguaje humano: cada lengua produce una serie digitalmente infinita de expresiones estructuradas de manera jerárquica con interpretaciones sistemáticas en interfaces con otros dos sistemas internos, el sistema sensoriomotor de la exteriorización y el sistema conceptual de inferencia, interpretación, planificación, organización de la acción y otros elementos de lo que informalmente llamamos «pensamiento». El enfoque general del lenguaje que ha adoptado dichas directrices se llama programa biolingüístico.

En la terminología actual, a una lengua entendida en estos términos la llamamos lengua interna o lengua I. Gracias a la «propiedad básica», cada lengua 1 es un sistema de «señales audibles para el pensamiento», según las palabras que el gran indoeuropeísta William D. Whitney (1908: 3) escribió hace un siglo; aunque ahora sabemos que la exteriorización no necesita estar limitada a las modalidades articulatorio-auditivas.

Por definición, y adaptando nociones tradicionales a un nuevo contexto, la teoría de una lengua I es su gramática generativa y la teoría general de las lenguas I es la gramática universal (GU). La GU es la teoría del componente genético de la facultad del lenguaje, la capacidad que facilita la adquisición y el uso concreto de lenguas I. La GU determina la clase de procedimientos generativos que satisfacen la «propiedad básica», y los elementos atómicos que entran en las computaciones.

Los elementos atómicos plantean profundos misterios. Los elementos mínimos de significado de las lenguas humanas –parecidos a palabras, pero no palabras– son radicalmente diferentes de todo lo que se conoce de los sistemas de comunicación animal. Su origen se pierde en la oscuridad, lo que plantea un problema muy serio con relación a la evolución de las capacidades cognitivas humanas, el lenguaje en particular. Existen conocimientos sobre estos temas que

se remontan a los presocráticos, que más adelante fueron desarrollados por destacados filósofos de los principios de la revolución científica moderna y la Ilustración, y que lo fueron más aún en los últimos años, aunque siguen estando insuficientemente explorados. De hecho, el problema, que es serio, no está suficientemente reconocido ni comprendido. Un examen cuidadoso muestra que doctrinas muy difundidas acerca de la naturaleza de estos elementos son insostenibles, por ejemplo, la doctrina referencialista tan difundida según la cual las palabras escogen objetos extramentales. Hay mucho que decir acerca de estos importantes aspectos, pero ahora vamos a dejarlos a un lado, sin por ello dejar de reconocer una vez más que los problemas que se plantean con relación a la evolución de la cognición humana son serios, mucho más de lo que suele reconocerse.

El segundo componente de la GU, la teoría de los procedimientos generativos, ha sido objeto de estudio, en realidad por primera vez, desde mediados del siglo XX. Para entonces, el trabajo de Gödel, Turing, Church y otros había asentado la teoría general de la computación sobre fundamentos sólidos, lo cual hizo posible emprender el estudio de la gramática generativa con una idea bastante clara de lo que ello implicaba. Los procedimientos generativos que constituyen las lenguas I deben reunir ciertas condiciones empíricas: por lo menos algunas se pueden aprender y la capacidad de adquirir y usar lenguas I evidentemente ha evolucionado.

Volvamos primero a la aprendibilidad. La adquisición de una lengua I se basa, evidentemente, en 1) las limitaciones genéticas de la GU, y 2) en los principios independientes del lenguaje. Está bien demostrado que la facultad del lenguaje está radicalmente disociada de otras capacidades cognitivas, algo que Lenneberg (1967) descubrió y analizó hace cincuenta años, y cuyos resultados se han ampliado considerablemente desde entonces (véase Curtiss, 2012, para revisarlo). Este

hecho, junto con el examen detallado de las propiedades de las lenguas, hacen que sea de esperar que el segundo factor, con toda probabilidad, consista sustancialmente en principios independientes del organismo, no otros procesos cognitivos. Para un sistema computacional como la lengua I, es probable que estos incluyan principios de eficiencia computacional que entran dentro de la ley natural. Y el estudio de la aprendibilidad tiene que enfrentarse al hecho de que lo que se adquiere con rapidez excede enormemente la evidencia a la que puede acceder el niño, una característica normal del crecimiento de un sistema biológico.

Volviendo a la evolución, lo primero que nos tiene que quedar claro es qué es lo que ha evolucionado. No son las lenguas, por supuesto, sino la facultad del lenguaje, es decir, GU. Las lenguas cambian, pero no evolucionan. Es inútil sugerir que las lenguas han evolucionado a través de la evolución biológica y no biológica –según terminología de James Hurford–. Lo último no es evolución en absoluto. Con estas precisiones en mente, vamos a utilizar el término convencional «evolución del lenguaje», aun reconociendo que puede ser, y que a veces es, engañoso.

Un hecho sobre la evolución del lenguaje que parece estar bastante fundamentado es que el lenguaje no ha experimentado ninguna evolución desde hace 60.000 años o más, desde que nuestros antepasados salieron de África. No se conocen diferencias de grupos en cuanto a la facultad del lenguaje, ni capacidades cognitivas en general, como ha señalado de nuevo Lenneberg (1967) Y ya hemos dicho en los capítulos 1 y 2. Otro hecho al que podemos recurrir, en este caso con menos confianza, es que no mucho antes de ese episodio, puede ser que el lenguaje no existiera. Por ahora, es razonable suponer que el lenguaje –más precisamente, la GU– surgió en algún momento en una ventana muy estrecha del tiempo evolutivo, pongamos que hace unos 80.000 años, y desde

entonces no ha evolucionado. En la literatura cada vez más abundante sobre la evolución del lenguaje, esta suposición se ha calificado a veces de «antidarwiniana» o, en otras palabras, que rechaza la teoría evolutiva, pero esta crítica se basa en graves errores de interpretación de la biología moderna, tal como se comenta más extensamente en los capítulos 1 y 4.

Aparte de estos dos hechos –uno sólido, el otro plausible–, la información de la que disponemos nos dice muy poco, y lo mismo vale para las capacidades cognitivas humanas complejas en general. Es esta una base muy delgada para estudiar la evolución del lenguaje. Sin embargo, da pie a una sugerencia: lo que evolucionó, la GU, ha de ser bastante simple en su esencia. Si es así, la aparente complejidad y variedad de las lenguas tendrá que derivarse de cambios desde que la capacidad compartida evolucionó, y probablemente estén localizados en los componentes periféricos del sistema, que puede que no hayan evolucionado en absoluto. Volveremos a ello. También podemos anticipar, como hemos señalado, que la apariencia de complejidad y diversidad en un campo científico muy a menudo solo refleja una falta de comprensión más profunda, fenómeno este bien conocido.

En cuanto se llevaron a cabo los primeros trabajos para construir gramáticas generativas, a mediados del siglo xx, se descubrió rápidamente lo poco que se sabía acerca de las lenguas, incluso de las que habían sido bien estudiadas. Por otra parte, muchas de las propiedades que revelaban los estudios minuciosos planteaban serios rompecabezas, algunos de los cuales todavía siguen sin resolverse hoy en día, junto con muchos otros nuevos que se van desenterrado por el camino.

En aquel momento, parecía necesario atribuir una gran complejidad a la GU para que reflejase los fenómenos empíricos de las lenguas y su aparente variedad. No obstante, siempre se supo que esta aproximación difícilmente sería correcta. La GU debe cumplir la capacidad de cambio., y cuanto más

complejo se suponga que es su carácter, mayor será la carga que tendrá que soportar la futura posible explicación acerca de cómo evolucionó, una carga muy pesada, como indican los pocos hechos conocidos sobre la evolución del lenguaje.

Por estas razones, junto con las consideraciones generales propias de la investigación racional, la investigación en las lenguas I y la GU, desde el principio, trató de reducir la complejidad de los supuestos con relación a su naturaleza y variedad. No nos proponemos revisar la historia de un progreso constante en esta dirección, sobre todo a partir de la cristalización del marco de los «Principios y Parámetros», a principios de la década de 1980, que significaron una manera de explicar el problema de la adquisición del lenguaje sin lo que parecía ser barreras insalvables, y abrieron el camino a una gran ampliación de materiales empíricos disponibles, estudiados hasta un grado de profundidad inimaginable.

A comienzos de la década de 1990, una serie de investigadores consideraron que ya habían aprendido lo suficiente y que sería razonable abordar la tarea de simplificar la GU desde una perspectiva un tanto diferente: se trataba de formular un caso ideal y preguntarse hasta qué punto el lenguaje se aproxima a ese ideal, y, a continuación, tratar de superar las numerosas discrepancias que se daban. Este trabajo ha recibido el nombre de Programa Minimalista, la continuación, sin costuras, del estudio de la gramática generativa desde sus orígenes.

La situación óptima sería que la GU se redujera a los principios computacionales más simples, que operan de acuerdo con las condiciones de la eficiencia computacional. Esta conjetura se llama a veces Tesis Minimalista Fuerte (TMF). Hace algunos años, la TMF habría parecido una idea muy extravagante, pero en los últimos años se han ido acumulando pruebas que sugieren que algo como esto promete bastante. Sería un descubrimiento sorprendente y significativo si se

pudiera demostrar, También abriría el camino para abordar el estudio de la evolución del lenguaje. Volveremos a esta cuestión después de unas pocas palabras sobre la prehistoria del estudio contemporáneo de la evolución del lenguaje.

Como ya hemos dicho, el problema de la evolución de la GU surgió en cuanto empezó el programa biolingüístico, hace unos sesenta años. Ya se había hablado de la cuestión muchos años atrás, cuando el lenguaje se consideraba como un objeto biológico interno. Evidentemente, si el lenguaje no se considera así, sería imposible tomarse el estudio de su evolución en serio. Los indoeuropeístas del siglo XIX solían considerar el lenguaje en términos internalistas, como una propiedad biológica de un individuo, pero había barreras para el estudio de su evolución. Las condiciones mínimas que hemos mencionado al principio no se cumplían; en concreto, no se entendía con claridad la naturaleza del sistema que evolucionaba, satisfaciendo la «propiedad básica». En 1886, la Sociedad Lingüística de París protagonizó la famosa prohibición de documentos sobre los orígenes del lenguaje, adoptando el punto de vista del eminente erudito William Dwight Whitney (1893: 279), según el cual «la mayor parte de lo que se ha dicho y escrito sobre ello no son más que palabras al viento», palabras que todavía hoy merecen ser objeto de atención.

Jean Aitchison se ha encargado de resumir con precisión la historia estándar de lo que sucedió a continuación, en el libro *Approaches to the Evolution of Language*, editado por James Hurford, Michael Studdert-Kennedy y Chris Knight (1998). Aitchison menciona la célebre prohibición sobre el tema de la evolución del lenguaje y luego da un salto hasta 1990, cuando, según sus propias palabras «todo cambió» con un trabajo de Stephen Pinker y Paul Bloom. Aitchison se refiere a continuación al rotundo apoyo de Hurford a la obra de Pinker y Bloom, que, de acuerdo con Hurford, «echó abajo algunas barreras intelectuales en curso para la comprensión de la relación entre

la evolución y el lenguaje» (Hurford, 1990: 736). El trabajo de Pinker y Bloom, continúa Aitchison, «hacía hincapié en que el lenguaje evolucionó por mecanismos evolutivos normales y comentaba que "existe una gran cantidad de información científica, nueva y respetable, relevante para la evolución del lenguaje y que nunca ha sido correctamente sintetizada" (Pinker y Bloom, 1990: 729)». Fue entonces cuando, según esta versión, este campo emprendió el vuelo y se convirtió en una disciplina floreciente.

La historia real resulta ser bastante diferente a nuestro modo de ver, pero no solamente por el rigor de la censura de Whitney. Durante el período estructuralista que siguió a Whitney, el lenguaje no solía verse como un objeto biológico, por lo que la cuestión de su evolución no se planteaba. El estructuralismo europeo adoptó, en general, la concepción del lenguaje de Saussure (en el sentido relevante) como entidad social, o, como dijo Saussure (1916: 31), como un almacén de imágenes de palabras en el cerebro de una colectividad de individuos basado en una «especie de contrato». Para el estructuralismo americano, un concepto estándar era el de Leonard Bloomfield, para quien el lenguaje consistía en una serie de hábitos para responder a situaciones con los sonidos del habla convencional, y para responder a estos sonidos con acciones; o, en una formulación diferente, el lenguaje es «la totalidad de enunciados producidos por una comunidad de habla» (Bloomfield, 1926: 155). Sean las que sean dichas supuestas entidades, no son objetos biológicos.

Las cosas cambiaron a mediados de siglo, cuando se empezaron a dar pasos para estudiar la lengua I en términos que satisficieran la «propiedad básica». Como hemos dicho, el problema de la evolución del lenguaje surgió de inmediato, pero no pudo ser abordado con seriedad. En los primeros años, la tarea consistió en la construcción de una teoría del lenguaje lo suficientemente rica como para permitir la descripción de

los hechos que se descubrieron en diversas lenguas. Pero cuanto más rica era la GU, mayor era la carga sobre la capacidad de cambio. Por consiguiente, poco se podía hacer.

Como ya hemos comentado en el capítulo 1, un importante paso adelante se dio en la obra titulada *Biological Foundations of Language*, de Eric Lenneberg, publicada en 1967, que fundó el estudio moderno de la biología del lenguaje. Este trabajo contenía un debate serio acerca de la evolución de la capacidad lingüística, con muchas ideas importantes y un argumento bastante sofisticado a favor de la discontinuidad de la evolución, fundamentado en razones biológicas. Pero el problema básico de la riqueza y complejidad de la GU persistía.

En los años siguientes hubo conferencias científicas internacionales y nacionales que congregaron a biólogos, lingüistas, filósofos y científicos cognitivos. La cuestión de la evolución se discutió pero con pocos resultados, por las mismas razones. Uno de nosotros (Chomsky) dirigía un seminario sobre biología del lenguaje en el MIT, en la década de 1970, junto al biólogo evolutivo Salvador Luria. Varios de los estudiantes estudiaban carreras relacionadas con este campo. La evolución del lenguaje fue uno de los temas principales, pero, una vez más, con poco que decir.

Los comentaristas, incluidos los historiadores de la lingüística, a veces observan que hay pocas referencias a la evolución del lenguaje en la temprana literatura sobre gramática generativa. Así es, pero al parecer nadie entiende el porqué. El tema era muy discutido desde la década de 1950, después por Lenneberg en su libro de 1967’1 así como por otros en congresos científicos, pero por las razones mencionadas, se llegaba a pocas conclusiones sustantivas, y esto explica la escasez de referencias.

De hecho, en la década de 1990, era poca la «cantidad de información científica, nueva y respetable, relevante para la

evolución del lenguaje» por sintetizar, ni había «barreras intelectuales» que echar abajo. Sin embargo, en aquel momento se produjeron varios cambios. Uno de ellos es el que hemos mencionado: los avances en el estudio de la GU plantearon la posibilidad de que algo como la TMF podía ser correcta, lo que sugería que una de las principales barreras para el estudio de la evolución del lenguaje podía superarse. El segundo fue la aparición de un estudio muy importante del biólogo de la evolución Richard Lewontin (1998), en el que explicaba detalladamente por qué era poco menos que imposible estudiar la evolución de la cognición, de la lengua en particular, mediante cualquiera de los enfoques conocidos hasta el momento. El tercero fue el comienzo de un diluvio de artículos y libros sobre la evolución del lenguaje, todos haciendo caso omiso de los rigurosos y convincentes argumentos de Lewontin, para su propio perjuicio en nuestra opinión, y casi siempre sorteando los avances en el conocimiento de la GU que abrían el camino a, por lo menos, algo de investigación en el tema.

De hecho, una conclusión común es que la GU no existe: la GU está muerta, como dijo Michael Tomasello (2009). Si es así, efectivamente no hay tema sobre la evolución de la GU, es decir, sobre la evolución del lenguaje en el único sentido coherente. En lugar de ello, la aparición del lenguaje se reduce a la evolución de los procesos cognitivos –que no se pueden investigar con seriedad por las razones que Lewontin ya explicó–. Y también es necesario ignorar la prueba sustancial en cuanto a la disociación de la facultad del lenguaje de otros procesos cognitivos, así como ignorar también la unicidad de la GU en los seres humanos, que es evidente desde el momento en que nacemos. Un bebé humano recién nacido selecciona instantáneamente de su entorno datos relacionados con el lenguaje, una tarea que dista de ser trivial. Un mono que posea aproximadamente el mismo sistema auditivo solo oye ruido. El bebé humano avanza en un proceso sistemático

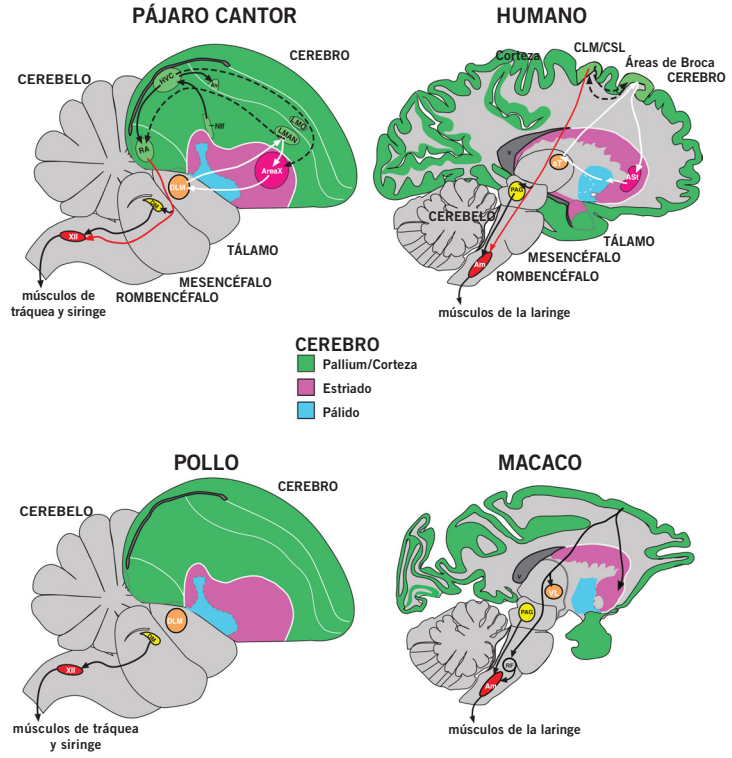

Lámina 1 (figura 1.1)

Comparación de relaciones cerebrales, conectividad y tipos de células entre individuos con aprendizaje vocal y sin aprendizaje vocal. Arriba: Solo los individuos con aprendizaje vocal (pinzón zebra macho, humanos) tienen una proyección directa desde la corteza vocal motora hasta las neuronas motoras vocales del tronco encefálico, como indican las flechas rojas. Abreviaturas: (Pinzón) RA: núcleo robusto del arcopalio. (Humano) CLM: corteza motora laríngea en la circunvolución precentral. CSL: corteza somatosensorial laríngea. Abajo: Los individuos sin aprendizaje vocal (pollo, macaco) carecen de esta proyección directa a las neuronas motoras vocales. Adaptación a partir de Pfenning *et al*., 2014. «Convergent transcriptional specializations in the brains of humans and song-learning birds». *Science* 346: (6215), 1256846: 1-10. Con la autorización de AAAS.

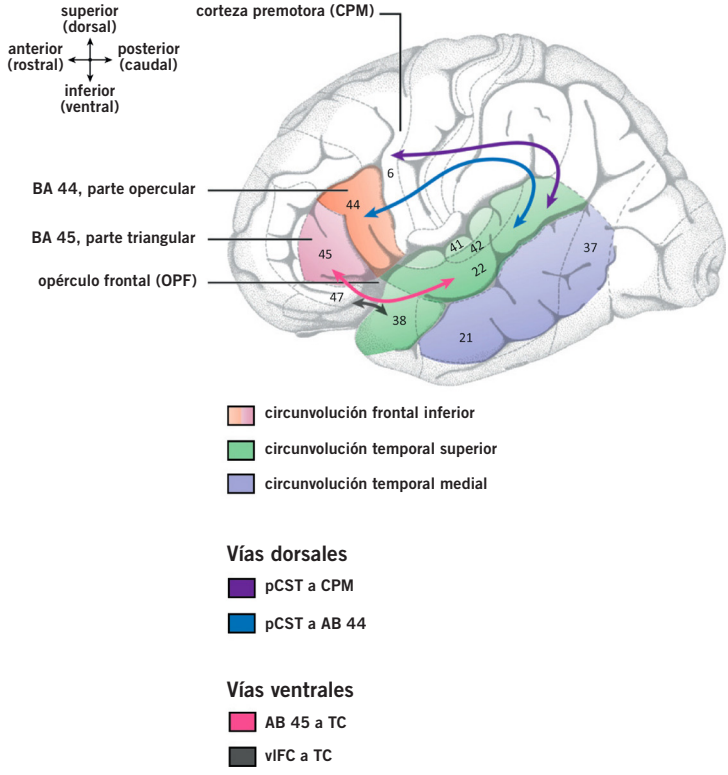

Lámina 2 (figura 4.4)

Regiones relacionadas con el lenguaje y fibras conectoras en el cerebro humano. Se muestra el hemisferio izquierdo. Abreviaturas: CPM, corteza premotora; CTS, corteza temporal superior; p, posterior. Los números indican las áreas de Brodman (AB) definidas citoarquitectónicamente. Hay dos vías dorsales: una que conecta pCST con CPM (rojo oscuro) y otra que conecta pCST con AB 44 (azul). Las dos vías ventrales que conectan BA45 y la corteza ventral inferior frontal (CVIf) con la corteza temporal (CT) también se cree que pueden estar relacionadas con el lenguaje. Berwick *et al*., 2013. «Evolution, brain, and the nature of language». *Trends in the Cognitive Sciences* 17 (2): 89-98. Con la autorización de Elsevier Ltd.

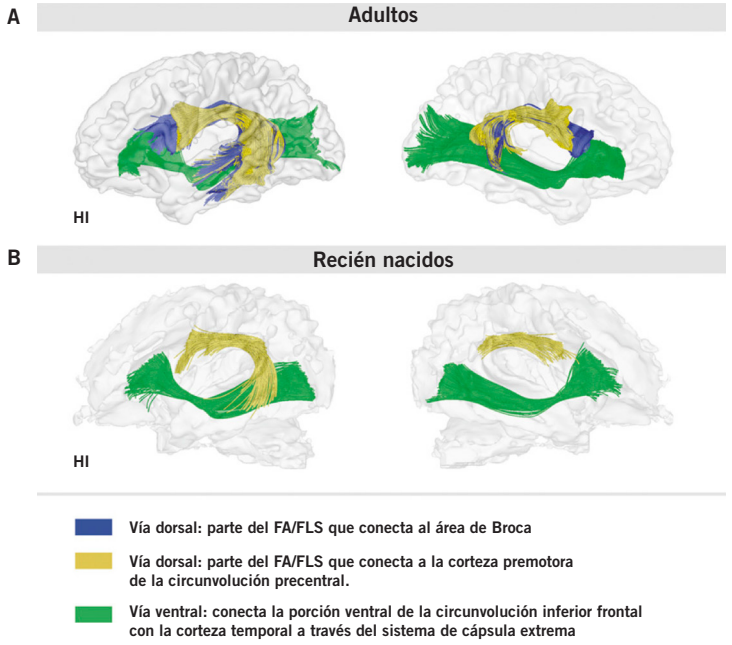

Lámina 3 (figura 4.5)

Conectividad dorsal y ventral en los adultos frente a recién nacidos, según lo determinado por el IRM tensor de difusión. FA/FLS =fascículo arqueado y fascículo longitudinal superior, (A): tractos de fibras en adultos del hemisferio izquierdo (HI) y el hemisferio derecho (HD). (B): tractos de fibras de recién nacidos de las conexiones comparables. Las vías dorsales que se conectan con el área de Broca no están mielinizadas al nacer. La direccionalidad se dedujo a partir de semillas en el área de Broca y en la circunvolución precentral / corteza motora. Perania *et al*., 2011. «Neural language networks at birth». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (38): 16056–16061. Con la autorización de *PNAS*.

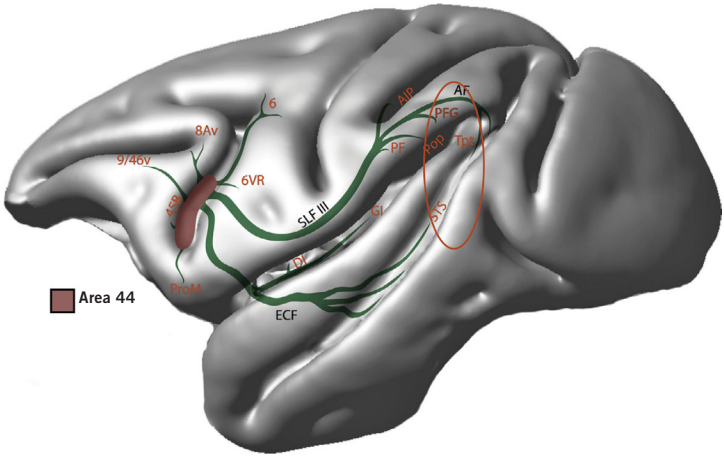

Figura 4.6 (lámina 4)

Las vías de fibras nerviosas de los macacos de las áreas de Brodmann 44 y 45B, determinadas a través del IRM tensor de difusión. Obsérvese la distancia entre la vía dorsal-ventral FA y la vía ventral STS, con un círculo rojo. Frey, Mackey y Petrides, 2014. «Cortico-cortical connections of areas 44 and 45B in the macaque monkey». *Brain and Language* 131: 36-55. Con la autorización de Elsevier Ltd.

de adquisición que es específico de los seres humanos, y que va demostrablemente más allá de lo que pueda proporcionar cualquier mecanismo general de aprendizaje, desde el aprendizaje de palabras hasta la estructura sintáctica y la interpretación semántica.

La enorme expansión de un campo que apenas existe plantea algunas preguntas interesantes sobre la sociología de la ciencia, pero ahora las dejaremos a un lado y volveremos a lo que parece ser un enfoque productivo de las preguntas que se plantean, haciendo hincapié en que ello está lejos de gozar de una visión de consenso.

En la medida en que la TMF lo permite, por lo menos podemos formular el problema de la evolución de la facultad del lenguaje de una manera coherente y potencialmente útil. Preguntémonos a continuación a qué conclusiones sobre el lenguaje y su evolución se llegaría en el supuesto de que algo parecido a la TMF se aproximara a la realidad.

Todos los sistemas computacionales incorporan dentro de sí, en alguna parte, una operación que se aplica a dos objetos, *X* e *Y*, ya formados, a partir de los cuales construyen un objeto nuevo, *Z*. A esta operación la llamamos Ensamble. La TMF establece que el Ensamble será lo más simple posible: no modificará ni *X* ni *Y*, ni impondrá sobre estos ningún orden; concretamente, los dejará sin ordenar, un hecho importante sobre el que volveremos. El Ensamble, por tanto, solo consiste en formar un conjunto: del Ensamble de *X* e *Y* se obtiene el conjunto {X, Y}.

El Ensamble en esta forma es un buen candidato para la operación computacional más simple. A veces se argumenta que la concatenación es todavía más simple. Es incorrecto. Para la concatenación se necesita ensamblar o una operación parecida, junto con el orden y algún principio para borrar la estructura, algo muy parecido a las reglas que producen una cadena terminal de un árbol etiquetado generado por una

gramática libre de contexto. Podemos pensar en el proceso computacional operando de este modo. Hay un espacio de trabajo, que tiene acceso al lexicón de elementos atómicos y contiene todo nuevo objeto que se construye. Para que una computación salga adelante, se selecciona un elemento *X* del espacio de trabajo, y luego se selecciona un segundo elemento *Y*. *X* e *Y* pueden ser dos elementos distintos en el espacio de trabajo, como cuando *leer* y *libro* se ensamblan para formar el objeto sintáctico subyacente en el sintagma *leer libros*. Esto se conoce como Ensamble Externo. La otra única posibilidad lógica es que uno de los elementos sea parte del otro, lo cual se llama Ensamble Interno, como cuando el sintagma *leerá qué libros* se ensambla con el sintagma *qué libros* dentro de esta y produce *qué libros leerá qué libros*, que es subyacente a la oración *adivina qué libros leerá* o *qué libros leerá* por otras normas. Este es un ejemplo de la ubicua propiedad de desplazamiento: los sintagmas se pronuncian en una posición y se interpretan en otra. Durante mucho tiempo se ha creído que el desplazamiento es una extraña imperfección del lenguaje. Bien al contrario, es una propiedad automática de un proceso computacional muy elemental.

Repetimos, el Ensamble de *leerá qué libros* y *qué libros leerá qué libros*, con dos apariciones de *qué libros*. La razón es que el Ensamble no modifica los elementos ensamblados: es óptimo. Resulta ser un hecho de una gran importancia. Esta propiedad de copia del Ensamble Interno da cuenta de la interpretación de expresiones con desplazamiento, dentro de una gama amplia y significativa. Entendemos que la oración *qué libros leerá* significa algo así como: «*para qué libros x*, *leerá libros x*», donde el sintagma qué libros tiene asignados roles semánticos distintos en dos posiciones. Propiedades de tal complejidad en la interpretación de oraciones quedan de inmediato fuera de esos supuestos óptimos sobre computación.

Para ilustrarlo con un ejemplo muy sencillo, veamos la oración *Los niños esperan encontrarse unos con otros*, lo que significa que «cada uno de los niños espera encontrarse con los demás niños». Supongamos que insertamos esta frase en el contexto *Me pregunto quién*, que da *Me pregunto quién los niños esperan encontrarse unos con otros.* La primera interpretación desaparece. Aquí el sintagma *unos con otros* remite al elemento remoto *quién*, no al elemento proximal *los niños*. La razón es que para la mente, aunque no para el oído, el elemento proximal es en realidad *quién*, en la expresión mental *Me pregunto quién los niños esperan encontrarse unos con otros*, gracias a la propiedad de copia del Ensamble Interno.

Pongamos un ejemplo más complejo y fijémonos en la oración *Cuál de sus cuadros espera la galería que a todos los artistas les guste más*. La respuesta puede ser: *su primero*, diferente para cada artista. El sintagma cuantificador *cada artista* une el pronombre *su* en el sintagma *cuál de sus cuadros*, aunque dicha interpretación no es posible en el sintagma, muy similar estructuralmente: *Uno de sus cuadros convenció a la galería de que a todos los artistas les gustan las flores*. La razón es la propiedad de copia del Ensamble Interno (desplazamiento). Lo que recibe la mente es *Uno de sus cuadros convenció a la galería de que a todos los artistas les gustan las flores*, una configuración normal para la unión mediante un cuantificador, como en *A todos los artistas les gusta más su primer cuadro.*

A medida que aumenta la complejidad, se presentan múltiples e intrincadas consecuencias. Está claro que nada de esto puede adquirirse por medio de inducción, el análisis estadístico de macrodatos u otros mecanismos generales, pero los resultados se deducen en una rica gama de casos de la arquitectura fundamental del lenguaje, suponiendo la TMF.

Si las dos copias se pronunciaran en ejemplos como los mencionados, la percepción sería mucho más fácil. De he-

cho, uno de los principales problemas que se presentan a las teorías de la percepción, y los motores de análisis sintáctico e interpretación, es el de encontrar los vacíos no pronunciados –los llamados problemas de llenado–. Hay una buena razón computacional por la que solo se pronuncia una de las copias: decir más daría lugar a una enorme complejidad computacional en todos los casos menos en los más simples. Por tanto, tenemos un conflicto entre eficiencia computacional y eficiencia de uso, y la eficiencia computacional gana de manera aplastante. Hasta donde se sabe, esto es cierto para todas las construcciones y en todas las lenguas. Aunque no hay tiempo para adentrarnos en ello ahora, existen muchos otros casos de competencia entre eficiencia computacional y eficiencia de uso (analizabilidad, comunicación, etc.). En todos los casos conocidos, se sacrifica la última: el diseño de lenguaje se queda con la eficiencia computacional. Los ejemplos no son en modo alguno menores. El caso que acabamos de comentar, por ejemplo, es el problema fundamental de la analizabilidad y la percepción.

Estos resultados sugieren que el lenguaje evolucionó por pensamiento e interpretación: es fundamentalmente un sistema de significado. La máxima clásica de Aristóteles de que el lenguaje es sonido con significado debe ser revertida. El lenguaje es significado con sonido (o con alguna otra exteriorización, o con ninguna); y la noción de *con* es tremendamente significativa.

La exteriorización sensoriomotora, pues, es un proceso auxiliar, que refleja las propiedades de la modalidad sensorial utilizada, con diferentes formas para el habla y los signos. También se seguiría de ello que la doctrina moderna según la cual la comunicación es en cierto modo la «función» de la lengua es errónea, y que una concepción tradicional del lenguaje como instrumento de pensamiento se acerca más a lo correcto. En un sentido fundamental, el lenguaje es realmente

un sistema de «señales audibles para el pensamiento», en las palabras de Whitney, que expresan la visión tradicional.

La concepción moderna, que la comunicación es la «función» del lenguaje (sea lo que sea que se suponga que significa exactamente), probablemente deriva de la creencia equivocada de que el lenguaje de alguna manera *tiene* que haber evolucionado a partir de la comunicación animal, a pesar de que la biología evolutiva no respalda tal conclusión, como ya dijo Lenneberg hace medio siglo. Y las pruebas disponibles lo contradicen contundentemente: en casi todos los aspectos importantes, desde el significado de la palabra hasta la «propiedad básica», en la adquisición y en el uso, el lenguaje humano parece que es radicalmente diferente de los sistemas de comunicación animal. También se podría especular que la concepción moderna también se deriva de las persistentes tendencias conductistas, que tienen poco mérito. Cualesquiera que sean las razones, las pruebas que tenemos se muestran a favor de la visión tradicional en que el lenguaje es fundamentalmente un sistema de pensamiento.

Existen más pruebas sustanciales que respaldan esta conclusión. Volvamos a decir que la operación computacional óptima, el Ensamble, no impone ningún orden sobre los elementos ensamblados. De ello se deduce, pues, que las operaciones mentales en las que participa el lenguaje deberían ser independientes del orden, que es un ret1ejo del sistema sensoriomotor. Cuando hablamos tenemos que poner un orden lineal a las palabras: el sistema sensoriomotor no permite una producción en paralelo, o la producción de estructuras. El sistema sensoriomotor ya estaba esencialmente en su sitio mucho antes de que apareciera el lenguaje, y parece tener poco que ver con él. Como ya hemos dicho, los monos, que se puede decir que tienen nuestro mismo sistema auditivo, solo oyen ruido cuando se produce lenguaje, mientras que un bebé humano recién nacido de inmediato extrae datos relevantes

para el lenguaje de su ruidoso entorno, y lo hace usando la facultad del lenguaje específica de los humanos, que está mucho más profundamente enraizada en el cerebro.

Algunos ejemplos de estas conclusiones son conocidos. Así, las lenguas verbo-objeto y objeto-verbo asignan los mismos papeles semánticos. Y las conclusiones parece que se generalizan mucho más todavía.

Estas observaciones tienen interesantes consecuencias empíricas. Fijémonos una vez más en los ejemplos ya presentados en el capítulo 1, oraciones como *las aves que vuelan instintivamente nadan*, y *el deseo de volar instintivamente atrae a los niños*. Estas frases son ambiguas: el adverbio *instintivamente* puede asociarse con el verbo anterior (*vuelan instintivamente*) o con el siguiente (*instintivamente nadan*, *instintivamente atrae*). Como ya hemos visto varias veces, supongamos que extraemos el adverbio de las frases, y que formamos *instintivamente*, *aves que vuelan nadan*, e *instintivamente*, *el deseo de volar atrae a los niños*. Ahora la ambigüedad se elimina: el adverbio se interpreta solo con el verbo *nadan*, *atrae*, no con el verbo proximal *vuelan*.

Este ejemplo ilustra la propiedad universal de la dependencia de la estructura de las reglas: las reglas computacionales del lenguaje ignoran la propiedad, muy simple, de la distancia lineal y se quedan con la propiedad, mucho más compleja, de la distancia estructural. Fue al dar los primeros pasos para construir gramáticas precisas cuando se observó este curioso rompecabezas. Han sido numerosos los intentos por mostrar que las consecuencias se pueden derivar de los datos y la experiencia. Todos fallan, totalmente, lo cual no es sorprendente. En casos como el que hemos mencionado, el niño no tiene prueba alguna para demostrar que la propiedad simple de la distancia lineal debe ser ignorada en favor de la propiedad compleja de la distancia estructural. Sin embargo, los experimentos muestran que los niños entienden que las reglas

dependen de la estructura en cuanto pueden ser sometidos a pruebas, alrededor de los tres años, y que no cometen errores –y por supuesto no han recibido instrucciones–. Todo esto se deduce de inmediato si suponemos que la TMF es válida y que las computaciones del lenguaje son lo más simples posible.

Los esfuerzos fallidos se ciñen a la inversión con auxiliar y a las oraciones de relativo, que, de hecho, fueron los primeros casos analizados. La limitación artificial indujo a error a los investigadores, que creyeron que el fenómeno podría tener algo que ver con las reglas de elevación, o que podía haber datos disponibles para el niño, o que el fenómeno podía tener algo que ver con la información presupuesta en los familiares. Incluso en estos términos, los esfuerzos son un completo fracaso, pero cuando nos trasladamos más allá de los primeros ejemplos de reglas de trabazón, que se comportan de la misma manera, aún queda más claro que se yerra completamente el tiro.

Hay una explicación muy simple para este desconcertante fenómeno, que es además la única que sobrevive a la inspección: los resultados se deducen del supuesto óptimo sobre la naturaleza de la GU, la TMF.

Mientras que algunos investigadores por lo menos han tratado de explicar los fenómenos, los hay que ni siquiera se dan cuenta de que se trata de un rompecabezas. F. J. Newmeyer (1998: 308), por ejemplo, propone que la estructura de dependencia de las reglas se deduce de la «presión del diseño para que *todos* los sistemas complejos que soportan información sean jerarquías estructuradas». De hecho, existen razones mucho más simples y más convincentes del porqué un procedimiento computacional da jerarquías estructuradas, pero este hecho no cambia en absoluto el rompecabezas. Está claro que tanto la jerarquía estructurada como el orden lineal existen; el rompecabezas es por qué la operación computacional simple de la distancia lineal más corta es universalmente ignorada en favor de la operación más compleja de la dife-

rencia estructural más corta. No sirve de nada decir que la jerarquía estructurada está al alcance. El orden lineal es así. Este es un error bastante común, incluso en muchos artículos técnicos de la literatura actual.

Por cierto, este es solo uno de una serie de errores que hacen que este artículo en particular sea irrelevante en cuanto a su objetivo de refutar las versiones anteriores de argumentos relacionados con los examinados aquí, errores que también socavan conclusiones de otros autores en el curioso volumen sobre la evolución del lenguaje en el que aparece, que hemos citado anteriormente.

La palabra «curioso» es apropiada. A veces, las malas interpretaciones que aparecen lo son, por cierto. Una de ellas es la confusión entre evolución y selección natural, *un* factor en la evolución, como destacó Darwin, pero no *el* factor. Otros son aún más raros. Así, Aitchison discute la «hipótesis de la eclosión» (como ella la denomina) en la que el lenguaje «podría haber "eclosionado" a la existencia con relativa rapidez» (Aitchison, 1998: 22). Para ilustrar lo absurdo de esta hipótesis, Aitchison menciona una referencia hecha por uno de nosotros (Chomsky) a la idea de que la mitad de un ala no sirve para volar, pero no dice que esta idea se sacó a relucir como una falacia y que las siguientes frases citan una publicación técnica en la que se indica que las alas de los insectos evolucionaron inicialmente como termorreguladores. Por desgracia, todo ello no son excepciones en la literatura sobre la evolución del lenguaje, pero no tenemos por qué demorarnos aquí. En los capítulos 1 y 4 se debate la cuestión de la «velocidad» relativa del cambio evolutivo, junto con la aparente prevalencia de cambios relativamente rápidos, sobre todo durante las principales transiciones en la evolución, y cómo un cambio más rápido concuerda con la línea cronológica paleoarqueológica conocida.

Volviendo al tema principal, también tiene cierta importancia que la aparente variedad y complejidad del lenguaje, y

su susceptibilidad al cambio, radican mayormente, y tal vez incluso completamente, en el proceso de exteriorización, no en los sistemas que generan las expresiones subyacentes y las suministran a la interfaz conceptual para otras operaciones mentales. Estas parece que son prácticamente uniformes en todas las lenguas, lo cual no sería sorprendente si fuera cierto, porque el niño prácticamente no recibe ninguna muestra sobre ellas, como en los casos simples que hemos mencionado; y los hechos adquieren tintes mucho más espectaculares cuando tomamos ejemplos de complejidad normal.

También existen pruebas, tanto neurológicas como experimentales, que apoyan las conclusiones sobre el carácter secundario de la exteriorización en una u otra modalidad, y por tanto del uso del lenguaje para la comunicación y otras formas de intercambio. Las investigaciones llevadas a cabo en Milán hace una década, iniciadas por Andrea Moro, mostraron que los sistemas sin sentido que atienden a los principios de la GU provocan una activación normal en las áreas cerebrales del lenguaje, pero que los sistemas más simples que usan el orden lineal violando la GU dan lugar a una activación difusa, lo cual implica que los sujetos las están tratando como un rompecabezas, no como un lenguaje sin sentido (Musso *et al*., 2003). Neil Smith y Ianthi-Maria Tsimpli (1995) aportan pruebas confirmatorias en su investigación de un sujeto cognitivamente deficiente pero lingüísticamente dotado. También hicieron la interesante observación de que los que no tienen deficiencias pueden resolver el problema si se les presenta como un rompecabezas, pero no si se les presenta como un lenguaje, lo cual es de suponer que activa la facultad del lenguaje. Estos estudios sugieren caminos muy interesantes que pueden recorrerse en neurociencia y psicolingüística experimental.

Para resumirlo brevemente, la conclusión óptima sobre la naturaleza del lenguaje sería que sus principios básicos son

extremadamente simples, quizás incluso óptimos para sistemas computacionales. Esta es la meta que se ha perseguido desde los primeros pasos en el estudio de la gramática generativa, a mediados del siglo XX. Parecía inalcanzable hace unos años, pero hoy lo es mucho menos. A partir de ese supuesto óptimo se derivan algunas conclusiones empíricas bastante interesantes. Vemos que el desplazamiento, lejos de ser una anomalía desconcertante, es en realidad una propiedad esperada en un lenguaje perfecto. Además, del diseño óptimo resulta la propiedad de copia de desplazamiento, con interpretaciones semánticas bastante ricas y complejas. También tenemos una explicación inmediata para el sorprendente hecho de que el lenguaje hace caso omiso de las propiedades simples del orden lineal y se basa uniformemente en la propiedad mucho más compleja de la distancia estructural, en todas las lenguas, y en todas las construcciones. Asimismo tenemos una explicación para el hecho manifiesto de que la diversidad, la complejidad y la maleabilidad del lenguaje están mayormente localizados, tal vez por completo, en un sistema auxiliar externo a los procesos centrales internos de la estructura del lenguaje y la interpretación semántica.

Si todo esto está en el buen camino, vemos que el lenguaje está bien diseñado para la eficiencia computacional y la expresión del pensamiento, pero plantea problemas de uso , en particular, en cuanto a la comunicación; vemos que el lenguaje es, en esencia, un instrumento del pensamiento, como se ha supuesto tradicionalmente. Huelga decir que el término «diseñado» es una metáfora. Lo que significa es que el proceso evolutivo más simple coherente con la «propiedad básica» del lenguaje humano da un sistema de pensamiento y entendimiento, computacionalmente eficiente, ya que no existen presiones externas que impidan este resultado óptimo.

Volviendo a los dos hechos sobre la historia evolutiva, una especulación plausible es que un mínimo recableado del

cerebro proporcionó el elemento central de la «propiedad básica»: un procedimiento computacional óptimo, que produce una variedad infinita de expresiones estructuradas jerárquicamente, cada una de ellas interpretada de manera sistemática en la interfaz conceptual con otros sistemas cognitivos. Esta imagen de un cambio biológico relativamente pequeño que comporta mayores efectos es, de hecho, la descrita en los capítulos 1 y 4, así como en la obra citada de Ramus y Fisher (2009). En realidad, no es fácil concebir una posibilidad diferente, ya que no puede haber una serie de pequeños pasos que conduzcan a una producción infinita. Tal cambio se produce en un individuo, y acaso, con suerte, también en la totalidad de sus hermanos, transmitido por uno o (menos probable) por ambos progenitores. Los individuos así dotados tendrían ventajas, y la capacidad pudo proliferar en un pequeño grupo reproductivo a través de generaciones. En algún momento, la exteriorización sería útil, pero plantea arduos problemas cognitivos: un sistema diseñado para la eficiencia computacional se debe aplicar a un sistema sensoriomotor que es bastante independiente de él. El problema se puede resolver de muchas maneras, aunque no sin restricciones, dando variedad y complejidad superficial, y tal vez implicando poca o ninguna evolución. Esto encaja bien con lo que observamos, y nos parece la especulación más parsimoniosa, aunque especulación de todos modos, por las razones expuestas por Lewontin (1998).

No hace falta decir que estas observaciones solo arañan la superficie. Existen trabajos recientes que indagan en la TMF en direcciones nuevas y creemos que prometedoras. Naturalmente, una vasta cantidad de fenómenos del lenguaje siguen sin explicación, apenas examinados, pero el paisaje que aquí hemos esbozado nos parece el más plausible que tenemos, y el que ofrece muchas oportunidades para la investigación y la indagación fructíferas.

4. TRIÁNGULOS EN EL CEREBRO

¿Fuera del alcance de la selección natural?

Alfred Russel Wallace, codescubridor de la teoría de la evolución por la selección natural, creía a pies juntillas en un estricto principio adaptativo de «utilidad necesaria»: *todas* las partes de un organismo tenían que servir para algo. Sin embargo, no pudo averiguar para qué servían las habilidades supremas de la mente humana –el lenguaje, la música humana y el arte– a nuestros antepasados. ¿Cómo contribuía un soneto de Shakespeare o una sonata de Mozart al éxito reproductivo? «La selección natural solo pudo dotar al salvaje con un cerebro un poco superior al de un simio, mientras que en la actualidad este posee uno muy poco inferior al de los miembros normales de nuestras sociedades científicas» (Wallace, 1869: 392). Su arrollador panadaptativismo superó el darwinismo del mismísimo Darwin (1859: 6), quien en *El origen* escribió la famosa frase que decía: «Estoy convencido de que la selección natural ha sido el medio principal de modificación pero no el único».

Así que Wallace cometió el delito, el delito de situar la selección fuera del alcance de la selección «natural»: «Por

tanto, debemos admitir la posibilidad de que en el desarrollo de la raza humana, una Inteligencia Superior haya guiado las mismas leyes [de variación, multiplicación y supervivencia] para fines más nobles» (1869: 394). Darwin se horrorizó. Le escribió a Wallace: «Espero que no haya asesinado del todo a su propio hijo y el mío» (Marchant, 1916: 240).

Creemos que el «delito» de Wallace al final no fue un pecado grave. Lo único que hizo Wallace fue mostrar la verdad: el darwinismo exigía una estricta continuidad gradual con el pasado, «modificaciones numerosas, sucesivas y leves» entre nuestros antepasados y nosotros. Sin embargo, existe un enorme abismo entre lo que nosotros podemos hacer y lo que otros animales no pueden hacer: el lenguaje. Y ahí está el misterio. Y como en todo buen misterio, tenemos que averiguar «quién es el culpable»: qué, quién, dónde, cuándo, cómo y por qué.

En lo que queda de capítulo vamos a hacer todo lo posible para responder a cada una de estas preguntas. En pocas palabras, nuestras respuestas a las preguntas sobre el lenguaje son las que siguen:

- El «qué» se reduce a la «propiedad básica» del lenguaje humano: la capacidad de construir una serie digitalmente infinita de expresiones estructurada de manera jerárquica con determinadas interpretaciones en las interfaces con otros sistemas orgánicos.[18]
- El «quién» es nosotros, los seres humanos anatómicamente modernos; ni chimpancés ni gorilas ni pájaros cantores.
- El «dónde» y el «cuándo» apuntan hacia algún momento entre la primera aparición de los humanos anatómicamente modernos en el sur de África, hace unos 200.000 años, pero antes del último éxodo de África, hace unos 60.000 años (Pagani, 2015).

- El «cómo» es la implementación neural de la «propiedad básica», poco conocida, pero que, según las pruebas empíricas recientes, podría ser compatible con un «ligero recableado del cerebro», como ya hemos dicho antes.
- El «por qué» es el uso del lenguaje para el pensamiento interno, como un pegamento cognitivo que une otros sistemas perceptivos y cognitivos de procesamiento de la información.

Por lo que sabemos, esta imagen de la evolución del lenguaje humano concuerda la mar de bien con la visión de Jacob y Monod de la evolución por selección natural como un *bricolaje* oportunista. A nuestro entender, la mayor parte de los ingredientes del lenguaje humano ya estaban en su sitio. Los circuitos corticales existentes se reutilizaron. Entonces, pequeños cambios genómicos provocaron efectos cognitivos relativamente grandes –precisamente la imagen esbozada por Ramus y Fisher (2009), a la que nos hemos referido en el capítulo 2–. A diferencia de algunos, a nosotros no nos parece que aquí haya ninguna necesidad de invocar chismes, una versión del pleistoceno de Google Maps, ni una obscura evolución cultural.

¿Qué?

Comenzamos abordando la pregunta del «qué», y nos referiremos de nuevo al esquema de los tres componentes del lenguaje mencionados en el capítulo 1. El primer componente, el «CPU» del lenguaje, abarca la operación composicional básica, el Ensamble. Los otros dos componentes, las interfaces para los sistemas sensoriomotor y conceptual-intencional, relacionan las estructuras que se ensamblan con los sistemas de «exteriorización» e «internalización», La exteriorización

incluye morfofonología, fonética, prosodia, y todo lo que participa en la producción de lenguaje hablado o gestual o en el análisis sintáctico del habla o de los lenguajes de signos. La internalización pone en relación las estructuras jerárquicas construidas por el Ensamble con los sistemas de razonamiento, inferencia, planificación y similares.

De acuerdo con la motivación básica del Programa Minimalista, suponemos que el Ensamble es lo más simple y lógico posible. Recordemos que en los capítulos 2 y 3 lo hemos definido como una operación diádica que toma dos objetos sintácticos cualesquiera como argumentos, por ejemplo, dos elementos atómicos –como palabras– del lexicón, como *lee* y *libros*, y devuelve la combinación de los dos elementos como un solo y nuevo objeto sintáctico, dejando los objetos sintácticos originales intactos. En el caso más simple, el Ensamble solo consiste en formar un conjunto. Luego el Ensamble puede aplicarse de modo recursivo a este nuevo objeto sintáctico estructurado jerárquicamente, y dar, por ejemplo, *el chico lee los libros*. De esta manera, el Ensamble construye recursivamente una serie infinita de representaciones estructuradas de manera jerárquica.

Es importante darse cuenta de que, junto con los objetos atómicos del lexicón –palabras–, el Ensamble es una innovación evolutiva clave para el lenguaje humano. Como veremos más adelante, y cuando respondamos a la pregunta «quién», parece claro que los animales no humanos son capaces de hilvanar y procesar elementos secuencialmente, al menos de una forma limitada. No obstante, como argumentaremos, no construyen representaciones estructuradas jerárquicamente comparables. El chimpancé Nim era capaz de memorizar dos combinaciones de «palabras», pero nunca estuvo cerca de la estructura jerárquica de la más simple de las oraciones (Yang, 2013). Recordando las palabras de Jacob a las que aludíamos en el capítulo 2, es precisamente el Ensamble, gracias

a su propiedad única de permitir «infinitas combinaciones de símbolos» y, por tanto, la «creación mental de mundos posibles», el que hace que el lenguaje sea mucho más que un sistema de comunicación animal.

Recordemos, además, lo también mencionado en el capítulo 1: que hay dos posibilidades lógicas de ensamblar cuando el Ensamble se aplica a dos objetos sintácticos *X* e *Y*. O bien *X* e *Y* están disociados, o bien uno de los dos, o *X* o *Y*, es una parte del otro. El primer caso es Ensamble Externo (EE), y el segundo es Ensamble Interno (EI). El Ensamble Externo guarda un vago parecido con lo que según una definición más conocida de la estructura jerárquica son las gramáticas libres de contexto o de tipo 2, pero también hay algunas diferencias muy significativas entre ambos. El vago parecido con reglas independientes del contexto ordinarias está claro. Por ejemplo, el Ensamble aplicado a *lee* y *libros* puede ser reflejado por la regla ordinaria independiente de contexto, SV $\rightarrow$ verbo SN. Esto define un sintagma verbal (SV) como un verbo seguido de un sintagma nominal (SN), como en *lee libros*. Los dos objetos sintácticos que van a ser ensamblados están a la derecha de la flecha, *lee* y el sintagma nominal *libros*. Sin embargo, observemos tres diferencias importantes y fundamentales. Primero, la regla independiente del contexto dice que la combinación jerárquica de *lee* y *libros* tiene una denominación determinada, sintagma verbal. Eso no forma parte del Ensamble, sino que el Ensamble necesita un algoritmo de etiquetado, que al menos en este caso se puede configurar para seleccionar el verbo en posición inicial, pero el algoritmo de etiquetado no produce nada llamado «sintagma verbal».[19]? Segundo, nada en el formato de la regla libre de contexto impide una norma como SP $\rightarrow$ verbo SN (un sintagma preposicional formado por el «ensamblaje» de un verbo y un SN). Tercero, como describiremos con más detalle a continuación, la regla libre de contexto especifica el orden

del verbo seguido de SN, mientras que el Ensamble los deja sin ordenar.

Muchas teorías lingüísticas contemporáneas contienen dichas reglas combinatorias libres de contexto en su núcleo; ninguna sorpresa, ya que las expresiones jerárquicas estructuradas ilimitadas son un hecho empírico fidedigno con relación a la sintaxis del lenguaje humano. Algunas teorías lingüísticas, como la gramática sintagmática estructural (Head-Driven Phrase Structure Ggrammar, HPSG) y la gramática léxico-funcional (Lexical-Functional Grammar, LFG) contienen componentes explícitos de estructuras de frases libres de contexto. (Hay versiones de la HPSG que incluso separan la dominancia de las relaciones de precedencia). Otras explicaciones, tales como la gramática de adjunción de árboles (Tree-Adjoining Grammar, TAG), pre-ensamblan un conjunto inicial finito de estructuras jerárquicas básicas pobladas de elementos atómicos léxicos y, a continuación, añaden una operación combinatoria –la adjunción– para aglutinarlas de manera recursiva a todas ellas. (Esto, de hecho, estaba bastante cerca de la forma en que la recursividad se introdujo en la versión original de la gramática generativa transformacional, mediante las que se llamaron transformaciones generalizadas). Otras teorías, como la gramática categorial combinatoria (Combinatory Categorial Grammar, CCG), carecen de reglas explícitas libres de contexto, pero, sin embargo, tienen ciertas operaciones «combinatorias» generales de tipo Ensamble que adhieren los átomos léxicos dentro de estructuras jerárquicas, en estrecha relación con los sistemas minimalistas que Berwick y Epstein (1993) fueron los primeros en destacar. En consecuencia, una parte de lo que decimos aquí sobre la evolución del lenguaje pasará intacto a todas estas teorías.

No obstante, una diferencia crucial entre muchas de estas teorías y la explicación basada en el Ensamble es que este

no impone ningún orden lineal o de precedencia sobre los elementos que aglutina. Podemos imaginar el resultado del Ensamble como una especie de triángulo: los dos argumentos para el Ensamble son los dos lados de la «base» del triángulo, y la etiqueta está en su «cúspide». Esta analogía visual no es exacta. La representación del Ensamble difiere fundamentalmente de un triángulo geométrico ordinario en que el *orden* de los dos elementos en la base no es fijo (puesto que las dos partes están ensambladas por formación de conjunto). Como resultado de ello, *lee* y *libros* están libres y pueden girar uno alrededor del otro como un móvil, de modo que su orden de izquierda a derecha es irrelevante e invisible para la sintaxis del lenguaje propiamente dicha, aunque no necesariamente para la rnorfofonémica, la fonética o la fonología.

Como señalamos en los capítulos 1y 3, un sello distintivo de la sintaxis del lenguaje humano es su uso de representaciones secuenciales jerárquicas y no de izquierda a derecha. Esto es pertinente para nuestra visión de la evolución del lenguaje, ya que creemos que estas dos representaciones, distintas entre sí, evolucionaron por separado. La secuenciación lineal la encontramos en pájaros y otros animales no humanos, así como en la exteriorización humana, en parte presuntamente relacionada con la secuenciación del control motor. En este sentido, las explicaciones de la neurobiología sobre el lenguaje, como la propuesta por Bornkessel-Schlesewsky *et al*. (2015), que niega a las representaciones jerárquicamente estructuradas todo papel en el lenguaje, provocan una profunda confusión en cuanto a la evolución del lenguaje humano. Mientras que su propuesta triunfa por decreto derrumbando la distancia evolutiva entre nosotros y otros animales, falla en el terreno empírico, ya que no tiene en cuenta el hecho fundamental de que la representación jerárquica está en el núcleo del lenguaje humano.

Bornkessel-Schlesewsky *et al*. no son en modo alguno los únicos que lo ven así. El punto de vista de «solo la secuencia

lineal» parece que está muy extendido en la literatura contemporánea de la ciencia cognitiva. Por poner solo un ejemplo más, en un reciente artículo publicado en *Proceedings of the Royal Society of London*, Frank *et al*. (2012) destacan un «modelo de uso del lenguaje no jerárquico», con el mismo argumento evolutivo de Bornkessel-Schlesewsky. Frank *et al*. sostienen que «consideraciones de simplicidad y continuidad evolutiva nos fuerzan a considerar que la estructura secuencial es fundamental para el procesamiento del lenguaje humano» (2012: 4528). Si bien es cierto que la historia evolutiva se simplifica si lo único que pueden hacer todos los animales es procesar secuencialmente elementos ordenados, este punto de vista tiene un problema. Es incorrecto. Las representaciones jerárquicas son omnipresentes en la sintaxis del lenguaje humano.

De hecho, la propia propuesta de Frank *et al*. para procesar una frase como *put your knife and fork down / deja tu cuchillo y tu tenedor*, que según ellos es «secuencial», en realidad pasa de contrabando una representación jerárquica tácita. ¿Qué es lo que proponen? Frank *et al*. dicen que una cadena de palabras como *deja tu cuchillo y tu tenedor* puede ser procesada mediante «el cambio entre flujos secuenciales paralelos» (Frank *et al*., 2012: 5). Cada flujo «trocea» las palabras en grupos: un flujo para la palabra *put / deja* (en última posición unida a la palabra *down*) un flujo para *your / tu*, y un tercer flujo para *cuchillo y tenedor.* Según los autores, puesto que un procesador de frases se mueve de izquierda a derecha a través de la cadena de palabras *deja tu cuchillo y tu tenedor*, se crearán tres hilos paralelos, separados al principio: primero, un flujo llevará la palabra *deja*; a continuación, con el flujo *deja* ya en la mano, se crea un flujo secuencial separado para *tu*, y, por último, el procesador abre un tercer flujo simultáneo para *cuchillo y tenedor.* Entonces, estos tres hilos se entretejen cuando finalmente encuentran la palabra *down*, que se une a *put*. En efecto, se establecen tres «cortes»

paralelos en la cadena de palabras de la oración, donde a cada «corte» se le ha asignado tácitamente su propia etiqueta, ya que ha sido separada de los otros flujos.[20] Fijémonos en que cada «trozo», como *put down*, puede consistir en palabras que están alejadas arbitrariamente entre sí en el *input*.

Aunque Frank *et al*. hacen todo lo posible para argumentar que esta representación no puede ser jerárquica –por ejemplo, dicen que los trozos de palabras no tienen «ninguna estructura jerárquica interna, sino solo elementos dispuestos secuencialmente» (2012: 6)–, no están en lo cierto, y *tiene* que ser jerárquica, porque de lo contrario el sistema no podría manejar adecuadamente *instintivamente los pájaros que vuelan nadan*. Recordemos que en este ejemplo, *instintivamente* modifica a *nadan*, no a *vuelan*, porque *nadan* está solo un nivel jerárquico «más abajo», mientras que *vuelan* está dos niveles «más abajo». Como muestra la figura 4.1, en este caso *instintivamente* está realmente más cerca de *nadan* que de

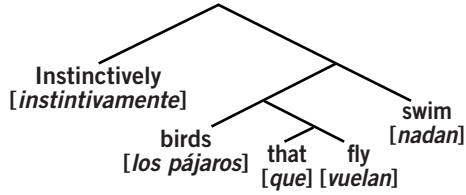

Figura 4.1

La estructura sintáctica humana está fundamentada en la estructura jerárquica, no en el orden lineal secuencial de izquierda a derecha. Aquí mostramos la estructura sintáctica de la oración *instinctively birds that fly swim*, cuyo significado es inequívoco en cuanto que *instinctively* modifica a *swim*, no a *fly*. Ello es así a pesar de que *instinctively* está más cerca de *fly* en el orden lineal. *Instinctively* se asocia con *swim* porque está más cerca de *swim* en distancia estructural: swim está incru stado un nivel más abajo que *instinctively*, pero fly está incrustado dos niveles más abajo que *instinctively*.

vuelan en términos de distancia estructural. Según parece, no es la distancia lineal la que manda en la sintaxis humana, solamente la distancia estructural. Esta propiedad se cumple en todas las construcciones relevantes de todas las lenguas, y se puede suponer que está enraizada en profundos principios de diseño óptimo, como ya hemos indicado anteriormente.

En el sistema de «flujos» de Frank *et al*., se deben vincular estos dos elementos, igual que *put* y *up* en el ejemplo de Frank *et al*. Pero ¿cómo es que el controlador (no especificado) del procesador sabe que ha de vincular estos dos elementos y no *instintivamente* y *vuelan*? El único método es consultar la «profundidad» de la estructura jerárquica, o algún agente que la represente. Por tanto, el sistema debe recurrir a una representación implícita para garantizar que las dependencias pertinentes se recuperan. El hecho de que haya algún controlador que pueda cambiar entre múltiples corrientes que contienen palabras que están arbitrariamente alejadas entre sí, utilizando información aparentemente jerárquica, otorga a este sistema una considerable capacidad computacional, en la dirección de la prevista por una máquina de Turing multicinta.

Esta convergencia (no intencional) destaca dos puntos que merece la pena recordar. En primer lugar, a menudo es difícil evitar completamente las representaciones jerárquicas cuando se intenta representar el conocimiento humano del lenguaje. La razón es muy simple: el lenguaje humano *es* jerárquico, lo cual debe representar de alguna manera, aunque la representación en sí sea tácita y de procedimiento. En segundo lugar, su propuesta ilustra que una *implementación* del procesamiento jerárquico puede ser indirecta, no la obvia explicación del «autómata de pila» que Frank *et al*. presumiblemente trataban de evitar. Una de las ventajas incidentales es que ello demuestra que puede haber muchas maneras, algunas indirectas, de implementar un método computacional para procesar la estructura jerárquica. Volveremos a este punto enseguida.

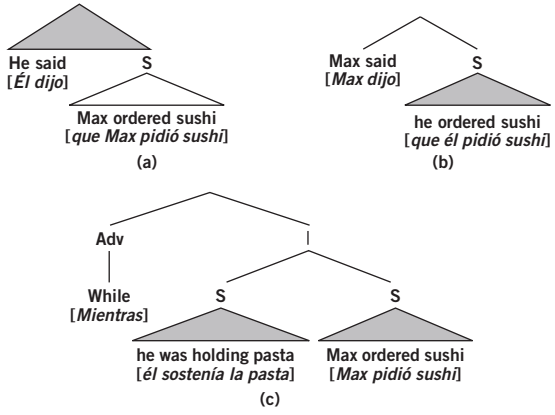

Figura 4.2

La posible conexión entre *he* y *Max* en la sintaxis del lenguaje humano está fijada por la estructura jerárquica, no por el orden lineal secuencial de izquierda a derecha. En cada ejemplo mostrado, el triángulo sombreado indica la estructura jerárquica que domina a *he*. El pronombre *he* puede estar vinculado a *Max* solo en caso de que el triángulo no domine también a *Max*. (a): En el primer ejemplo, el triángulo sombreado domina a *Max* , por lo que el vínculo es imposible. (b), (e): En el segundo y tercer ejemplos, con independencia del orden de izquierda a derecha de *he* y *Max*, el triángulo sombreado no domina a Max, por lo que el vínculo está permitido. Ejemplos de Crain (2012).

En cuanto empezamos a sondear más profundamente en las propiedades del lenguaje, resulta evidente que la estructura jerárquica también es fundamental en otros aspectos. Consideremos ejemplos como el siguiente de Crain (2012). En la oración *Él dijo que Max pidió sushi*, ¿puede ser *él* la misma persona que *Max*? No. La regla que nos enseñaron en la escuela primaria es que si un pronombre, como *él*, precede a un antecedente potencial, como *Max*, las dos palabras no pueden estar vinculadas. Todo bien hasta aquí. ¿Qué pasa con *Max dijo que él pidió sushi*? Ahora *Max* precede a *él*, o sea, que pueden estar vinculadas (pero no necesariamente: *él* podría ser otra persona). Por ahora, bien.

Pero la regla de la escuela primaria no acaba de funcionar. Pongamos un ejemplo más: *Mientras él sostenía la pasta, Max pidió sushi*. Ahora *él* puede ser *Max*, a pesar de que *él* precede a *Max*. ¿Qué ha pasado con nuestra regla? Una vez más, una regla correcta puede que se base en «triángulos» –estructura jerárquica–, y en el orden de izquierda a derecha. Aquí está la restricción: el primer triángulo que contiene el pronombre, *él*, no puede contener además el nombre o sustantivo. Vamos a ver cómo funciona examinando la figura 4.2. La figura 4.2 muestra los tres ejemplos, y las partes sombreadas indican el «triángulo que contiene el pronombre». En el primer ejemplo, el triángulo sombreado que contiene *él* también contiene *Max*, de modo que *él* y *Max* no pueden ser la misma persona. En el segundo ejemplo, el triángulo sombreado que contiene *él* no contiene *Max*, de modo que *él* y *Max* sí pueden ser la misma persona. Por último, en el tercer ejemplo, el triángulo que contiene *él* tampoco contiene *Max*, de modo que de nuevo *Max* y *él* pueden ser la misma persona, incluso aunque *él* aparece antes que *Max* en el orden secuencial lineal.

Una vez más, parece que el cerebro no compute el orden de izquierda a derecha en absoluto cuando se trata de la sintaxis interna.[21]

Si a las computaciones sintácticas internas no les importa que *lee* precede a *libros* o que *Max* preceda a *él*, entonces sería de esperar que el orden de las palabras variara de una lengua a otra, yeso es precisamente lo que encontramos, El orden de las palabras es un centro de variación lingüística. Tanto el japonés como el alemán son lenguas de verbo final, como puede verse en *hon o yomimasu* («libros leer») en japonés. Dado que el Ensamble construye expresiones jerárquicamente estructuradas como *conjuntos*, el orden de los dos elementos que forman la «base» de cada triángulo construido mentalmente es irrelevante, y cada lengua escogerá diferentes opciones a la hora de exteriorizar la estructura jerárquica,

cuando las palabras deben producirse en un determinado orden secuencial de izquierda a derecha en el habla o los gestos.

Creemos que esta clara división del trabajo entre orden jerárquico y orden lineal tiene consecuencias importantes para la historia evolutiva que se oculta tras el lenguaje humano. En nuestra opinión, solo en los seres humanos el Ensamble trabaja codo a codo con elementos como palabras. En otros animales, no.

Se puede destacar aún más la di visión jerárquica lineal por las grandes diferencias entre la descripción formal de lineal como opuesto a estructura jerárquica, una diferencia reflejada en las descripciones computacionales de las restricciones del sistema lineal de sonidos del lenguaje humano en tanto opuestas a la sintaxis del lenguaje humano (Heinz e Idsardi, 2013: 114). Evidentemente, los sistemas de sonidos del lenguaje humano («fonotáctica») siempre se pueden describir en términos de restricciones lineales puramente asociativas, que dictan qué sonidos puede preceder o seguir a otros sonidos. Tales restricciones se conocen formalmente en la literatura como *relaciones regulares*. Por ejemplo, los angloparlantes saben que en inglés *plok* es una posible secuencia de sonidos, pero que *ptok* no lo es. Dichas restricciones siempre pueden ser descritas en términos de máquinas de estados finitos. Veamos cómo.

Como ejemplo más realista desde un punto de vista lingüístico, Heinz e Idsardi citan el caso comprobado de la armonía sibilante en el navajo (atabascano), que permite «sibilantes solo en posición anterior (por ejemplo, [s, z]) o sibilantes no anteriores (por ejemplo, [*ʃ*, ʒ]) (Hansson, 2001; Sapir y Hoijer, 1967). Por ejemplo, las palabras que contienen la forma [… s … s …] son palabras posibles en navajo, pero las palabras con la forma [… s … *ʃ* …] y [… *ʃ* … s], no» (Heinz e Idsardi, 2013: 114). (El sonido sibilante *ʃ* suena como el comienzo de la palabra inglesa *shoe*, mientras que ʒ

es como el sonido de la palabra inglesa *vision*). Esto significa que [s] y [*ʃ*] no se pueden preceder el uno al otro; los puntos suspensivos indican que cualquier número de sonidos puede aparecer en medio. Por ejemplo, *dasdolsis* («él tiene el pie levantado») es una palabra posible en navajo, pero *dasdoliʃ*, no. Es fundamental saber que todas estas restricciones se basan únicamente en la cadena de precedencia, o sea, qué sonidos preceden o siguen a otros sonidos. Esto, por supuesto, contrasta agudamente con el Ensamble, que literalmente ignora las relaciones de precedencia, como ya hemos visto.

Ahora bien, las restricciones relativas a qué sonidos pueden preceder o seguir a otros son materia prima para la descripción como máquinas de estados finitos. Siempre se pueden escribir dichos tipos de restricciones de precedencia lineal en términos de redes de transición de estados finitos –grafos etiquetados y dirigidos con un número finito de estados, arcos etiquetados y dirigidos entre esos estados donde las etiquetas denotan sonidos o clases de equivalencia de sonidos, y estados designados de inicio y final–. Al trazar los caminos a través de una red de este tipo, a partir de un estado inicial a un estado final de doble círculo, se detallan todas las combinaciones lineales de sonidos válidas a través de la secuencia de etiquetas en los caminos desde el estado de inicio hasta el estado final.

Como ejemplo, la parte superior de la figura 4.3 muestra una red de transición de estado finito que refleja la restricción navaja descrita por Heinz e Idsardi según la cual *s* y *ʃ* no pueden precederse el uno al otro. Con el fin de disminuir la confusión, se utiliza el símbolo V para indicar cualquier vocal, y C para indicar cualquier consonante anterior no sibilante (es decir, una consonante distinta de s o *ʃ*). Podemos comprobar fácilmente que esta red obliga a cumplir la restricción requerida mediante una secuencia como *dasdolif*, que no es una palabra bien formada en navajo (ya que incumple la

restricción de que *s* no puede ir seguida de *f*) o *dasdolis*, que es una palabra válida en navajo. La máquina rechazará la primera y aceptará la última. Aquí no nos vamos a detener en los detalles, pero el lector interesado puede seguir leyendo en la nota que se acompaña.[22]

Lo que sí nos importa más es que esta simple máquina de estado finito de tres estados puede hacer que se aplique correctamente la restricción de la armonía incluso cuando la distancia en cuanto a número de sonidos que median entre *s* y la correspondiente *s* (o una *f* transgresora) es arbitraria. La máquina solo tiene que recordar dos cosas: si una palabra ya se ha encontrado con una sibilante anterior (estado 1) o una sibilante no anterior (estado 2). Formalmente, decimos que el conjunto de cadenas (o lengua) aceptado por una red de este tipo forma un lenguaje regular. Tengamos en cuenta que aunque es cierto que este tipo de lenguas pueden incluir cadenas que son arbitrariamente largas, también es cierto en un sentido más profundo que los patrones reflejados por las cadenas son estrictamente finitos y limitados; por ejemplo, un par de *s* separadas por una sola consonante no sibilante tiene la misma importancia que un par de *s* separadas por mil consonantes.

Sin embargo, el hecho de ser regular no da mucho de sí a la hora de describir sistemas de sonido del lenguaje humano. Heinz e Idsardi hacen hincapié en ello, «aunque ser regular puede que sea una característica *necesaria* de las generalizaciones fonológicas, ciertamente no es *suficiente*» (Heinz e Idsardi, 2013: 115). Es decir, los sistemas de sonido humanos (y de otros animales) atienden a una descripción más correcta como un estricto *subconjunto* de las lenguas habituales; de hecho, por un subconjunto altamente restringido de la clase de todas las redes de transición de estados finitos. No servirá cualquier red de estado finito, y, por lo que sabemos, lo mismo vale para el canto de los pájaros. La parte central de la

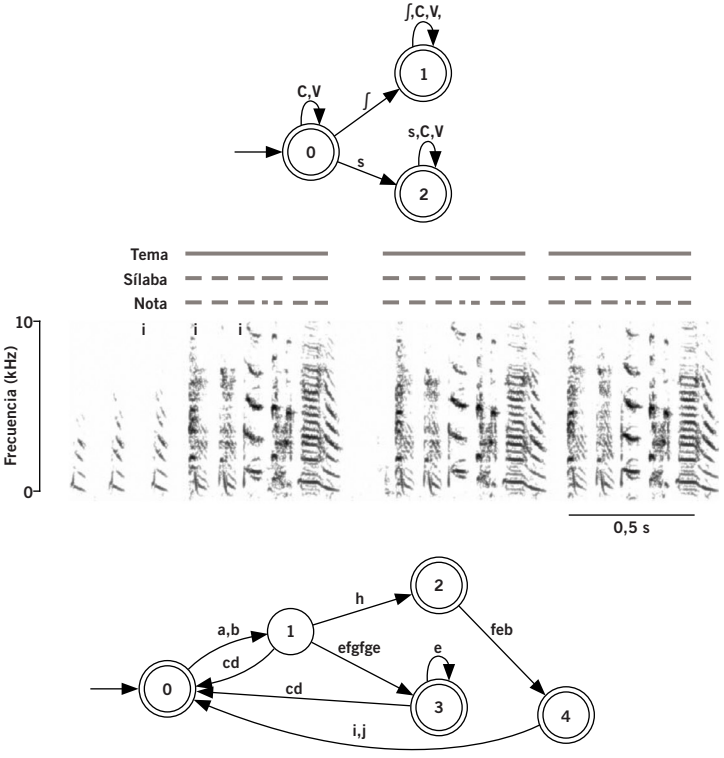
ʃ,C,V,
1
C,V
ʃ
0
s,C,V
s
2
Tema
Sílaba
Nota
10
Frecuencia (kHz)
0
i
i
i
0,5 s
2
h
a,b
1
feb
efgfge
e
cd
cd
0
3
4
i,j

Figura 4.3

Análisis de redes de transiciones de estados finitos de un sistema de sonido del lenguaje humano y del canto de un pinzón cebra bengalí, donde se muestra su estrecha relación. (Arriba): Diagrama de transición de estados finitos, un gráfico etiquetado y dirigido que describe una restricción fonotáctica para palabras navajas bien formadas, de Heinz e Idsardi (2013). La restricción prohíbe la aparición en cualquier posición de una *s* seguida de *f*, o al contrario; solo se admite *s* … *s* o *f* … *f*. Las transiciones C, V indican cualquier consonante o vocal diferentes de *s* o *f*. Los estados con doble círculo son estados finales. La palabra es «analizada» empezando por el estado más a la izquierda y luego recorre la palabra carácter por carácter viendo si se puede terminar en un estado final sin dejarse ningún carácter. (Centro): El espectrograma de sonido del canto típico del pinzón cebra, en el que se representa una estructura en capas. Los cantos suelen comenzar con «notas introductorias seguidas por uno o más «temas», que son secuencias de sílabas repetidas. Una «sílaba» es un sonido ininterrumpido, que consiste en una o más trazas de tiempo-frecuencia coherentes, llamadas «notas». Una interpretación continua de varios temas se llama una «tanda de canto». Las sílabas marcadas *a*, *b*, …, *j* fueron identificadas mediante reconocimiento humano y con la ayuda de una máquina. (Abajo): Posibles secuencias de notas o sílabas del canto del pinzón bengalí representadas por una red de transición de estados finitos. Las transiciones comienzan con el primer estado más a la izquierda, representado como un círculo abierto. Los enlaces de transición dirigidos entre estados están etiquetados con secuencias de notas. Adaptado de Berwick *et al*., 2011. «Songs to syntax». *Trends in Cognitive Sciences* 15 (3): 113-121. Con la autorización de Elsevier Ltd.

figura 4.3 muestra un sonograma real que se grabó a un único pinzón bengalí, mientras que la parte inferior muestra una red de transición de estados finitos análoga modelizando este canto, donde las letras *a*, *b*, …, *j* indican fragmentos de canto tal como se etiquetan en el sonograma.

¿Qué restricciones adicionales se necesitan para especificar la clase de restricciones fonotácticas *naturales*? Al menos en parte, parece que estas son *condiciones de localidad* determinadas. Los contextos que describen posibles patrones están estrechamente delimitados de la manera que vamos a describir a continuación. Se hipotetiza que las redes de transición de estados finitos para las restricciones fonotácticas que obedecen a las restricciones de localidad pertenecen a

uno de los dos subconjuntos de los lenguajes regulares, ya sea (i) lenguajes regulares *estrictamente k-locales*, ya sea (ii) lenguajes regulares estrictamente *k-a trozos* (Heinz e Idsardi, 2013). Intuitivamente, este tipo de lenguajes regulares limitados por el contexto describen patrones que son, o bien (i) subsecuencias contiguas particulares hasta cierta longitud fija de *k* (como en nuestro ejemplo de la lengua inglesa que admite dos elementos secuenciales como *pl*, pero que descarta *pt*, o sea, con $k = 2$) ; o bien (ii) subsecuencias, no necesariamente contiguas, hasta cierta longitud fija y finita de *k* (como en nuestro ejemplo del navajo, donde es correcta la subsecuencia de dos elementos s … s, pero no lo es la subsecuencia s …*f*, aquí de nuevo con $k = 2$). En general, ambas atienden a un principio de «contexto limitado», ya sea literalmente, en la propia cadena, o bien en términos de elementos que deben «mantenerse en la memoria».

En sintaxis existe un tipo de restricción parecido. Las dependencias introducidas por el Ensamble Interno son ilimitadas, como en la frase siguiente: *¿cuántos coches dijiste a tus amigos que tenían que decir a sus amigos… que tenían que decir a los mecánicos que arreglaran* [*x muchos coches*]. Aquí [*x muchos coches*] es la copia eliminada en la exteriorización y no hay límite en el material elidido indicado por «…» (y, por supuesto, son posibles innumerables sustituciones). No obstante, existen pruebas procedentes de fuentes diversas de que la dependencia se construye gradualmente: el Ensamble Interno pasa a través del límite de cada oración, si no hay nada que bloquee el Ensamble en esa posición, por ejemplo otra palabra interrogativa. Por tanto, aunque la frase anterior sea correcta, la siguiente, que es muy parecida, no lo es: *¿cuántos coches dijiste a tus amigos por qué tenían que decir a sus amigos… que tenían que decir a los mecánicos que arreglaran* [*x muchos coches*]. En este caso, *por qué* parece que bloquea el proceso.

El parecido puede que no sea una coincidencia. Es posible que ilustre la misma restricción sobre la búsqueda mínima operando en dos diferentes tipos de dominios, el primero, la estructura lineal, y el segundo, la estructura jerárquica.

No vamos a insistir aquí en los detalles formales de esta cuestión, pero todo indica que las implicaciones para la lingüística y la ciencia cognitiva son importantes. Tanto los lenguajes regulares estrictamente locales como los estrictamente a trozos se demuestra que pueden aprenderse a partir de un número computacionalmente factible de ejemplos positivos (Heinz, 2010). Es importante destacar que estas dos restricciones de localidad excluyen muchas reglas fonotácticas obviamente «no naturales», como una que dictara que cada quinto sonido de una lengua fuera algún tipo de consonante, lo que se llama lenguaje «contador». Los lenguajes «contadores» no son lenguajes naturales.

Al parecer, los cantos de los pájaros también contienen restricciones de tipo fonotáctica. Okanoya (2004) descubrió que el canto del pinzón bengalí presenta este tipo de restricción, en una variante de lo que Berwick y Pilato estudiaron como los lenguajes de estados finitos k-reversibles, con $k = 2$, un subconjunto muy parecido a los lenguajes regulares, y también muy fácil de aprender. Hablaremos de esto un poco más en el siguiente apartado.

Restricciones de localidad como estas han tenido su papel en el establecimiento de pruebas de aprendibilidad de otras versiones de la gramática generativa transformacional. Entre los resultados conocidos está la demostración de Wexler y Culicover (1980), su llamada «teoría de la aprendibilidad de grado 2», basada en una noción de «grado de error limitado», que demuestra que la teoría de la gramática transformacional de la década de 1970 era aprendible a partir de ejemplos simples y positivos de profundidad jerárquica limitada. En un trabajo relacionado, Berwick (1982, 1985) estableció

un resultado con relación a la aprendibilidad para la teoría de rección y ligamento de la década de 1980, también para ejemplos positivos simples y jerárquicamente limitados, dentro del contexto de un programa de análisis sintáctico aplicado a la gramática transformaciona1. Ambos enfoques utilizan la noción de «contexto jerárquico limitado» con la finalidad de restringir el dominio sobre el cual un alumno podría hipotetizar reglas (posiblemente incorrectas). Al hacer finito este dominio, se puede garantizar que después de un número finito de intentos incorrectos, el alumno encontrará una hipótesis correcta; solo puede haber un número finito de errores detectables y/o hipótesis formuladas correctamente. (En la jerga terminológica del aprendizaje automático contemporáneo, diríamos que las restricciones de Wexler-Culicover y Berwick reducen la dimensión Vapnik-Chernovenkis o dimensión VC del espacio de posibles gramáticas/lenguajes desde el infinito hasta un valor finito [pequeño], lo cual garantiza la aprendibilidad). Las investigaciones preliminares sugieren que restricciones de localidad similares pueden tener un papel en el establecimiento de la aprendibilidad para las teorías gramaticales de tipo Ensamble.

Sea como fuere, el contexto local limitado proporciona al menos una caracterización *parcial* clara y cognitivamente detallada de las limitaciones *naturales* en los sistemas de sonido que tanto nosotros como los pájaros cantores utilizamos para la exteriorización. Aunque no sabemos con exactitud cómo se implementan literalmente en el cerebro las redes de transición finitas, las propuestas sobre este tema se remontan por lo menos a la obra de Kleene titulada *Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata* (1956).

¿Qué pasa con la computación de la estructura jerárquica? Como ya se sabe desde hace sesenta años, esta sigue sencialmente fuera del alcance de las redes de estados finitos. Tengamos en cuenta que, formalmente, el álgebra para los lenguajes

definidos por las redes de estados finitos *debe* obedecer a la asociatividad por concatenación de cadenas, una limitación que hace que este tipo de sistemas sea inadecuado para describir la estructura sintáctica jerárquica. Para ver por qué, consideremos solo tres símbolos, *c*, *a* y *t*. Dejaremos que un círculo abierto ° indique la cadena de concatenación, y para la legibilidad usaremos paréntesis con los que indicar el orden de la concatenación. Supongamos que una red de transición de estados finitos acepta la cadena *cat*. Ello significa que si e primero se concatena con *a*, y luego el resultado de *c* ° *a* se concatena a su vez con *t*, la cadena resultante cat, es decir, (*c* ° *a*) ° *t*, debe ser aceptada por el autómata de estados finitos. Por asociatividad, también es cierto que si a ° se concatena primero con t, a ° *t*. y luego *c* se concatena con el inicio del resultado, *c* ° (a ° *t*), esto vuelve a producir la cadena *cat*, y esta cadena también debe ser aceptada por el mismo autómata. Hasta ahora lo único que hemos hecho es reafirmar la definición de asociatividad. Ahora viene lo interesante. Si la concatenación lineal y la asociatividad son *todo* lo que tenemos disponible, significa que una secuencia de palabras como *cielo azul oscuro* no se puede interpretar como estructuralmente ambigua, es decir, *cielo* (*azul oscuro*) como opuesto a (*cielo azul*) *oscuro*, puesto que los dos distintos órdenes de composición son equivalentes bajo la concatenación de cadenas asociativas. Pero si no podemos distinguir los dos diferentes órdenes de composición, no podemos distinguir las dos diferentes estructuras con dos significados diferentes. Este es el conocido fracaso de lo que se llama capacidad generativa fuerte, es decir, la incapacidad de poder representar lo que tienen que ser estructuras distinguibles, descritas por primera vez por Chomsky (1956) como una de las razones de por qué los sistemas de estados finitos no sirven en última instancia para describir el conocimiento lingüístico humano.[23]

Desde un punto de vista formal, la maquinaria computacional necesaria para la estructura jerárquica se ha entendido

bien desde Chomsky (1956): conocemos los requisitos mínimos para construir estructuras jerárquicas. Recordemos que cuando ensamblamos dos objetos sintácticos *X* e *Y* solo hay dos casos lógicamente posibles: o bien *X* e *Y* están disociados, o bien uno es una parte del otro. (Excluimos el caso en el que *X*, *Y* son idénticos).

Si *X* e *Y* son objetos sintácticos disociados, se aplica el Ensamble Externo, y esta operación puede ser más o menos imitada por las reglas de lo que Chomsky llamó al principio gramática de tipo 2 o libre de contexto, como mostraron Berwick y Epstein (1993) originalmente. Pero como en el caso de los lenguajes regulares y de las gramáticas o autómatas que las reflejan, decir simplemente que un lenguaje es un lenguaje libre de contexto, o que su correspondiente gramática está libre de contexto (*Contet-free* Grammar, CFG), no es lo bastante contundente, porque hay muchas CFG (la mayoría) que no son descripciones del conocimiento humano del lenguaje, y, lo más importante, las CFG no funcionan en absoluto como buenas descripciones del conocimiento humano del lenguaje; un hecho señalado ya desde Chomsky (1957), sobre el que volvieron a insistir Chomsky (1965) y otros desde entonces, que describiremos brevemente a continuación.

Si un objeto sintáctico es parte del otro, tenemos un Ensamble Interno. En este caso hace falta un poco más de atención para averiguar qué capacidad computacional se necesita en todos los casos. Una extensión que se sabe que funciona en el sentido de por lo menos replicar oraciones posibles y sus estructuras se conoce como gramática múltiple libre de contexto (*multiple context-free grammar*, CMFG), según lo descrito por Stabler (2011), entre otros. Aquí no nos interesan la mayoría de detalles con respecto a este tipo de gramáticas; nos referimos al formalismo de las CMFG con el fin de ilustrar que realmente no hay ninguna barrera para las teorías basadas en el Ensamble modelizadas formal o

computacionalmente, o para construir analizadores sintácticos eficientes para este tipo de sistemas, al contrario de lo que a veces se ha dicho. Por lo que sabemos, todas las teorías lingüísticas contemporáneas que cubren la misma amplia gama de ejemplos empíricos –desde HPSG hasta LFG, TAG, CCG y los sistemas minimstas– van a la par desde un punto de vista estrictamente computacional.[24] (Aunque las teorías difieren empíricamente y en otros aspectos).

Una CMFG amplía las gramáticas libres de contexto ordinarias al incluir variables *dentro* de nombres no terminales a los lados izquierdo y derecho de las reglas. Estas variables pueden establecerse por igual en cadenas terminales, y entonces podemos utilizarlas después efectivamente para «indexar» los objetos sintácticos copiados en un marco basado en el Ensamble. En otras palabras, en lugar de tener una regla como SV $\rightarrow$ verbo SN, aumentamos los símbolos SV y SN con variables como las siguientes: SV (x) $\rightarrow$ verbo SN (x), donde x tiene un determinado valor, por ejemplo, un valor de cadena como *qué*. Esta capacidad adicional nos permite simular lo que hace el Ensamble Interno en algunos casos.[25]

Aquí tenemos un ejemplo simplificado para ilustrarlo. Si tenemos un objeto sintáctico como *John adivinó qué* (más precisamente el objeto sintáctico como conjunto correspondiente a esta cadena de palabras), podemos aplicar el Ensamble Interno a X = *John adivinó qué* e Y = qué, lo que nos dará un objeto sintáctico más largo. Llamémoslo el sintagma «CP», que contiene las palabras *qué adivinó John qué*. Podemos reproducirlo en una MCFG aumentando una regla libre de contexto convencional que amplíe el CP de este modo (los detalles son irrelevantes) como un «Complementante» seguido de un Sintagma de Inflexión: SC $\rightarrow$ C SI. Un aumento de la MCFG correspondiente se podría escribir como sigue, donde ahora hemos colocado las variables de cadena x, y dentro de los nombres no terminales SP y SI: SC (yx) $\rightarrow$ C SI (x, y).

Aquí *yx* indica la concatenación de *x* e *y*, mientras que SI tiene dos variables en las que estas cadenas se mantienen separadas. Si *x* = *qué* e *y* = *John comió qué*, la cadena concatenada *yx* corresponde a *qué comió John qué*, y las normas aumentadas se pueden hacer de modo que reproduzcan la «copia» que realiza el Ensamble Interno. (Hemos omitido los detalles que muestran exactamente cómo se lleva a cabo todo esto. Los lectores interesados pueden consultar Kobele, 2006; Stabler, 2012; o Graf, 2013).

Insistimos en recalcar que ni CFG ni MCFG son descripciones correctas del lenguaje humano. Al igual que las gramáticas de redes de transición de estados finitos o sus correspondientes lenguajes, todas describen con demasiada facilidad muchas lenguas y estructuras que nunca se comprueban. Y lo que es más importante aún, no generan las *estructuras* correctas en las lenguas humanas que sí que están comprobadas –parecido al problema de *cielo azul oscuro*–. Y a veces pueden hacerlo, pero solo añadiendo una enorme lista de reglas extrañas. He aquí un ejemplo.

Berwick (1982, 2015) y Stabler (2011, 2012) demuestran que para que CFG o MCFG repliquen adecuadamente los patrones interrogativos con *wh-* observados en inglés deben imponerse restricciones sobre estos sistemas *post facto*, fundamentalmente como una lista de todos los sintagmas excluidos entre el *qué* frontal y su posición (ilícita) después de *lee*. Esto conduce a una ampliación exponencial del tamaño de las CFG o MCFG resultantes, una señal de alerta de que estos sistemas se limitan a enumerar explícitamente las posibilidades y no a reflejarlas como una regla concisa y sistemática. La generalización correcta de restricciones de este tipo no tiene que enumerar las clases particulares de sintagmas entre *qué* y el objeto de *lee*, porque en una primera aproximación al sintagma ensamblado (copiado) internamente no le importa lo que hay entre donde empieza y donde aterriza, a menos que

se produzca la intervención de elementos que impidan más ensamblaje interno, de la manera descrita anteriormente para los ejemplos de «mecánicos y coches», más arriba. En resumen, los sistemas con tales constricciones añadidas carecen de *adecuación explicativa* en el sentido que le da Chomsky (1965), y que describió formalmente Berwick (1982, 1985). Esta secuencia desde estados finitos hasta autómatas de pila y autómatas ampliados tiene algo del anillo de la progresión evolutiva, lo que sugiere un escenario evolutivo subyacente, pero nos parece que se trata de un señuelo. Debemos resistirnos a la sugerencia. Es demasiado fácil imaginar una *Scala Naturae* medieval al acecho, una humilde ameba en tierra de estados finitos, primates subiéndose a la pila, en última instancia con nosotros *aspera per astra* mediante un salto a un contexto de sensibilidad moderado. Algunos es exactamente esto lo que han propuesto; véase Steedman (2014), al que nos referimos en la nota 9. Sin embargo, hay un inconveniente en esta imagen de ameba y ángeles, la trampa de la máquina de Turing que King y Gallistel (2009) han puesto de relieve.

Parece que la navegación de los insectos, como la navegación por estima de las hormigas que regresan con alimentos a sus nidos, requiere la capacidad de «leer de» y «escribir a» celdas de memoria similares a cintas simples. Pero si es así, eso es todo lo que se necesita para una máquina de Turing. Así que si todo esto es cierto, las hormigas ya han subido por toda la escalera de la Naturaleza. El rompecabezas, de nuevo, es que al parecer las hormigas no construyen expresiones jerárquicas complejas arbitrariamente como lo hacen las personas.[26]

Resumiendo nuestra respuesta a la pregunta sobre el «qué» hasta ahora: hemos establecido una línea muy clara y destacada entre nosotros y todos los demás animales: nosotros, pero no el resto de animales, tenemos el Ensamble, y, como consecuencia, nosotros, pero ningún otro animal, podemos

construir series ilimitadas de expresiones jerárquicamente estructuradas, con la propiedad ubicua de desplazamiento, que en última instancia están fundamentadas en elementos atómicos lexicos , como palabras, que dependen de la mente, y con determinadas interpretaciones en las interfaces en cada etapa de generación. También hemos descrito, una vez más de forma abstracta, el mecanismo computacional para computar dichas expresiones. Junto con muchas otras personas, creemos que todo esto se puede llevar a cabo con el «cerebro humano» cortical existente y rediseñado, aunque al final de este capítulo presentaremos algunas especulaciones adicionales en cuanto a lo que se requiere.

Todo esto podría ser considerado como la respuesta a lo que David Marr (1982) llamó el primer nivel de análisis de cualquier sistema de procesamiento de la información, o sea, cuál es el problema que se está resolviendo. ¿Cómo se computa la «propiedad básica»? ¿Cómo logra el sistema de la lengua ensamblar expresiones jerárquicas arbitrarias? Más allá de esto se encuentran las preguntas de Marr sobre otros dos niveles: el de los algoritmos y las implementaciones. ¿Podemos decir algo más acerca de la respuesta al «qué» con relación a los niveles de Marr?

La cuestión, que es bien conocida, es que hay muchos muchos algoritmos e implementaciones que pueden llevar a cabo esta tarea, lo cual es un problema. Lo que sabemos sobre la cognición humana subdetermina enormemente las opciones que aquí se presentan, lo mismo que cualquier implicación evolutiva. Lo máximo que podemos decir es bastante trivial: que las palabras dependientes de la mente trabajan junto con la «propiedad básica». Con esto nos haremos una idea de lo que podemos esperar que haya en el cerebro, como se describe al final de este capítulo. ¿Qué más?

En lo que concierne a algoritmos e implementaciones, las palabras popularizadas por Richard Feynman (1959) son

sumamente pertinentes: «Hay espacio de sobras en el fondo». No solo hay espacio de sobras en el fondo, se pueden realquilar manzanas enteras en medio y también áticos. En el «fondo» de la filosofía de todo neurofisiólogo existen mundos inimaginables; los circuitos del cerebro humano solamente se han clasificado en los términos más burdos posibles, como «memorias de trabajo serial», «codificación neural», «cadenas *synfire*», «codificación poblacional», y similares. Estas denominaciones apenas son el comienzo de las posibilidades a las que pueden recurrir los verdaderos arquitectos informáticos. Es muy muy poco el conocimiento sistemático del diseño de circuitos de capas de abstracción –desde la arquitectura de flujo de datos hasta los diseños de CPU en *pipeline* y el procesamiento asincrónico–, que tiene que abrirse camino en la práctica de la modelización cognitiva. Un simple vistazo a un libro estándar sobre arquitectura de ordenador (por ejemplo, Hennessy y Patterson, 2011) nos revelará una auténtica abundancia de ideas de diseño. Hace casi cuarenta años, uno de nosotros (Berwick) señaló que incluso el más minúsculo empujoncito en los supuestos –la introducción de la más mínima cantidad posible de paralelismo fijo en una instrucción– podría poner eso que de otro modo se hubieran considerado teorías lingüísticas dispares en la misma categoría que las predicciones psicolingüísticas.

Consideremos solo el nivel algorítmico, dejando a un lado por el momento la amplia gama de posibles implementaciones dado un algoritmo determinado cualquiera. Tomemos el algoritmo más simple para la computación de expresiones jerárquicas ordinarias. Un libro de texto estándar sobre análisis sintáctico libre de contexto describirá varios enfoques diferentes. Una visión naif hará que usemos algún tipo de «autómata de pila», ya que eso es lo que dice la teoría más estándar sobre lenguajes formales. Sin embargo, en el capítulo 1 se ha señalado que implementar los autómatas de pila

todavía parece problemático en las redes bioenergéticamente realistas.

Los libros de texto sobre análisis sintáctico del lenguaje natural ofrecen explicaciones detalladas sobre cómo hacerlo. Tal vez, los algoritmos más ampliamente utilizados para las computaciones libres de contexto no usan en absoluto autómatas de pila explícitos, sino que estos métodos, como el de Cocke-Younger-Kasami (1967) o los algoritmos de Earley (1970), tienen una forma *indirecta* de proporcionar la misma información que un autómata de pila.

¿Cómo trabajan? Dada una oración de *n* palabras de largo, estos métodos suelen construir algo así como la mitad superior de una serie *n* por *n*, una matriz bidimensional, y «la llenan» poco a poco con elementos con la etiqueta «ensamblados» en determinadas células, dependiendo de si el ensamblador puede etiquetar adecuadamente. Por ejemplo, dada la oración *John lee libros*, la matriz tendría un tamaño de unas 3 × 3 células, y una etiqueta para el resultado de ensamblar *lee* y *John* ocuparía la celda de la matriz 2, 3. En una gramática convencional libre de contexto es trivial especificar la etiqueta correspondiente: si hay una regla que combina un verbo y un SN en un SV, entonces, como hemos visto anteriormente, la etiqueta es solo un SV, y lo colocaríamos en la celda en la posición (2,3). Todo esto incluso parece muy plausible desde un punto de vista neuronal de bajo nivel, en el que podemos visualizar las células de la matriz como ubicaciones de memoria. (Más abajo decimos que estas no tienen que ser «abordadas» como en los ordenadores convencionales).[27]

¿Dónde está el autómata de pila en este paisaje? Las *columnas* de las matrices representan implícitamente las posiciones de pila. Esta falta de una pila «transparente» no debería ser una sorpresa. Consideremos una máquina de Turing, que, en definitiva, debería ser capaz de llevar a cabo cualquier computación. Las máquinas de Turing tampoco tie-

nen pilas; estas tienen que ser «emuladas», a menudo de una manera desagradablemente indirecta, como habrá descubierto todo estudiante que haya tratado de hacer un ejercicio sobre «programación» con la máquina de Turing. Las extensiones directas a MCFG y el Ensamble Interno/Externo se pueden encontrar en Kobele (2006) o Kallmeyer (2010).

De hecho, pocos algoritmos de análisis sintáctico construyen explícitamente «árboles de análisis». A menudo, estos se dejan implícitos, porque computarlos suele ser una pérdida de valiosos recursos computacionales. En cambio, cualquier interpretación semántica se puede leer procedimentalmente a partir del orden en el que se producen los Ensambles. Igual que con las pilas, la falta de estructuras de árbol explícitas en la computación del lenguaje, por lo visto, también ha confundido a algunos científicos cognitivos, que insisten en que las estructuras de árbol (estructuras de barras) son esenciales, y por ello imponen un *requisito necesario* a las representaciones lingüísticas mentales/cognitivas; por tanto, explicaciones lingüísticas que suponen que las estructuras de árbol deben ser descartadas como poco realistas cognitivamente. Eso es doblemente incorrecto. La teoría lingüística nunca ha impuesto tal restricción; en realidad, la verdad es todo lo contrario. Como ha explicado cuidadosamente el lingüista Howard Lasnik (2000), las representaciones en las formulaciones originales de la gramática transformacional eran de la teoría de conjuntos, no de la teoría de grafos: los árboles son una simple ayuda pedagógica. Recordemos que la «propiedad básica» también construye conjuntos.

Las representaciones basadas en conjuntos en realidad son bastante compatibles con las concepciones de la arquitectura neuronal que utilizan lo que a veces se llama memoria de contenido direccionable, sobre la que de vez en cuando se sugiere que es una organización más plausible para la memoria humana que el direccionamiento convencional utilizado en

la arquitectura de los ordenadores portátiles comunes. En un ordenador convencional, las direcciones van como los números de las casas en una calle: localiza la casa #114 porque va después de la #112, o quizás porque un vistazo a una libreta de direcciones indica el número. Con un sistema de contenido direccionable, los recuerdos se recuperan en términos de las características de la casa: tejas grises, tres pisos, moderna, junto a un estanque. Las operaciones de búsqueda se realizan por correspondencia de características.

Todo esto debería empezar a sonarnos. Ciertamente, es un paisaje cómodo para los psicólogos contemporáneos de la comprensión de oraciones; véase el trabajo de Van Dyke y Johns (2012). Pero también es bastante compatible con los enfoques basados en el Ensamble. ¿Cómo es eso? Recordemos que la estructura nuclear ensamblada por el Ensamble consta de dos objetos sintácticos más una etiqueta. La etiqueta en sí proporciona un conjunto de características, suministrando contenido para operaciones de búsqueda; los objetos sintácticos de abajo también tienen características etiquetadas, de modo recursivo, o bien en función de las características de los átomos lexicales de tipo palabras. Es posible que en un principio se piense que este cúmulo de características podría enredarlo todo, pero no es así. De hecho, en las décadas de 1960 y 1970 se generalizó el uso de la memoria de contenido direccionable para la descomposición jerárquica de imágenes visuales; véase, por ejemplo, el extenso y conocido trabajo de Azriel Rosenfeld y Harry Samet sobre «árboles quad» en la Universidad de Maryland (Rosenfeld 1982; Samet y Rosenfeld, 1980). Rosenfeld mostró que la memoria de contenido direccionable proporciona una implementación natural, eficiente y sencilla de la estructura jerárquica. No vamos a insistir ahora en esta cuestión, excepto para señalar que de nuevo parece que haya cierta confusión en cuanto a que la estructura jerárquica no se presta a la representación

fácil en los sistemas de memoria de contenido direccionable, presumiblemente más de tipo «cerebro». Por el contrario, los resultados de la ciencia de la computación estándar muestran que ello es incorrecto. Entonces, ¿por qué no tiene un uso más amplio este tipo de memoria? La economía. Una de las razones por las que hace unas décadas se abandonó la memoria de contenido direccionable fue su coste. No había ninguna desventaja conceptual, solamente una desventaja competitiva. Los circuitos integrados a gran escala con direccionamiento estándar eran más baratos. Pero los días de la memoria de contenido direccionable puede que vuelvan. Los científicos cognitivos que quieren tener un conocimiento pleno de la amplia gama de posibles «implementaciones» compatibles incluso con los ordenadores de silicio convencionales harían bien en examinar la historia[28] del diseño de la arquitectura de ordenadores de contenido direccionable.

También hay flexibilidad en el orden de ejecución de estos algoritmos. Desde hace tiempo se sabe que mediante el uso de métodos de programación dinámicos y «memorizando» resultados parciales, se pueden alterar los patrones de búsqueda utilizados en los algoritmos CKY o Earley para trabajar estrictamente de arriba abajo, estrictamente de abajo arriba, o virtualmente en cualquier variante lógicamente coherente que haya entre ambas. Los métodos no dictan un *orden* específico en el que tengan que llenarse las células. Esto lo sabe muy bien la comunidad de investigadores que ha estudiado con minuciosidad los enfoques de «análisis como deducción».

Incluso después de treinta años de trabajo, siguen apareciendo nuevos resultados todos los años que muestran cómo alterar estos patrones de computación para casar mejor las cargas de procesamiento similares a las humanas. Este sigue siendo un campo abierto; véase, por ejemplo, Schuler *et al*. (2010), con relación a un método conocido desde hace más de veinticinco años que «gira» alrededor de la aparente estructura

de ramificación de un lenguaje para permitir el procesamiento, de oraciones de manera que la carga de memoria no aumenta innecesariamente a medida que se avanza de izquierda a derecha por la oración. De hecho, quien aportó una versión de la misma solución por primera vez fue Stabler (1991) hace varias décadas, para demostrar que no hay *ninguna* contradicción entre los tres supuestos siguientes: 1) la comprensión gradual, la interpretación tan pronto-como-sea- posible de las palabras de una oración; 2) estructura sintáctica de ramificación a la derecha, y 3) el uso directo de una «gramática de competencia» lingüística. Mientras que a algunos les urge rechazar los supuestos 2 o 3, Stabler demuestra que es bastante fácil cumplir con todos los supuestos si se permite entremezclar los pasos. Como señala Stabler, se puede empezar construyendo e interpretando unidades ensambladas antes de construirlas *completamente*, al igual que es posible comenzar a preparar una comida y luego comenzar a servir un plato sin haber terminado toda la preparación, «la ensalada puede estar en el plato antes de que la carne esté hecha» (1991: 201).

Describir todos estos trucos del comercio algorítmico requeriría otro libro entero, y no es nuestro propósito aquí escribir un libro sobre el procesamiento del lenguaje natural. Lo que nos interesa es simplemente que hay *muchos tipos* diferentes de algoritmos por explorar, cada uno con diferentes implicaciones posibles tanto para la fidelidad psicolingüística como para el cambio evolutivo, si es que nos imaginamos que el análisis sintáctico eficiente finalmente tiene alguna importancia para el éxito evolutivo.

Pero todavía no hemos terminado. Todas las posibilidades discutidas hasta ahora giran en torno a la computación *en serie*. Hay un conjunto similar de algoritmos paralelos distintos para el análisis sintáctico de los lenguajes de tipo Ensamble –que, a su vez, podrían tener implicaciones evolutivas–. Aquí vamos a señalar un método básico: una

aplicación diseñada para circuitos VLSI (integrados a muy gran escala) (Koulouris *et al*., 1998). También en este caso se basa en un método de serie o matriz, una versión de silicio del algoritmo de Earley. Las matrices se prestan a formas simples de computación paralela, porque podemos rellenar algunos elementos simultáneamente, recorriendo las columnas en paralelo. En un ejemplo como *el chico lee libros*, las operaciones de etiquetado y ensamble para *lee libros* pueden hacerse al mismo tiempo que las operaciones para *el chico*. Hay muchos detalles sobre cómo coordinar dichas computaciones y aquí no tenemos espacio para tratarlos: cubren el ámbito de una serie de diferentes tipos de arquitecturas de computación paralela, tanto de «grano grueso», cuando las unidades interconectadas son grandes, como de «grano fino», cuando las unidades son pequeñas. El paralelismo de grano grueso en comparación con el paralelismo de grano fino se ha tratado al menos en parte con relación a la versión más antigua de la gramática transformacional, la teoría de Principios y Parámetros (P & P) (Fong, 1991). Es fácil ver cómo funciona aquí el paralelismo de grano grueso: la teoría de P & P tenía alrededor de 20 módulos (teoría de caso, principio de la categoría vacía, teoría de la X-barra, teoría de ligamiento…) que conspiraron para autorizar posibles estructuras de oraciones. Algunos de ellos se pueden ejecutar con independencia de los demás, mientras que otros, como la teoría de ligamiento que hemos ejemplificado anteriormente en las oraciones con *Max*, dependen de la computación previa de configuraciones estructurales. Fong hizo una investigación inicial sobre cuáles de ellos podrían ser ejecutados en corrutina (ejecutados a la vez), y cuáles se ejecutan por separado, calculando la carga de rendimiento resultante. Una vez más, todavía está por hacer un análisis completo de este tipo de entrelazamiento más sofisticado de una teoría gramatical a gran escala, para ver si los detalles realmente importan. Por lo que sabemos, no se ha intentado

seriamente implementar una versión paralela de un programa de análisis sintáctico para un sistema de tipo Ensamble más contemporáneo.

¿Qué hay del tercer nivel de la implementación de Marr? Otra vez nos encontramos con muchas puertas abiertas. Los lectores que deseen explorar este aspecto en el contexto de un único algoritmo para análisis sintáctico libre de contexto, con claras extensiones al análisis sintáctico minimalista, pueden consultar Graham, Harrison y Ruzzo (1980), donde verán que los métodos de tipo CKY tienen numerosas opciones de implementación, dependiendo de cómo, exactamente, una arquitectura de ordenador puede almacenar listas en la memoria, precompilar cadenas de reglas, y cosas parecidas. No tenemos el conocimiento detallado ni siquiera para seleccionar entre clases equivalentes de posibilidades, porque cada una de ellas da lugar a rendimientos computacionales muy diferentes. No importa cuál sea, está claro que los problemas de Feynman y Gallistel siguen estando ahí.

¿Quién?

Sabemos que los animales no humanos sobresalen en muchas tareas cognitivas complicadas. Los córvidos –los cuervos, por ejemplo– son muy inteligentes en muchos dominios cognitivos; tienen la capacidad de crear herramientas, de realizar razonamientos espaciales y causales sofisticados, y de recordar la localización y la calidad del alimento que han escondido. Las charas californianas son capaces de hacer bajar cuerdas atadas alrededor de pequeños guijarros y meterlas dentro de grietas para atraer a hormigas que les servirán de almuerzo.

Aunque algunas aves como las codornices y las gallinas no aprenden a vocalizar, los pájaros cantores son capaces de un aprendizaje vocal bastante sofisticado. Los pájaros cantores

machos enseñan a los jóvenes, quienes deben aprender el canto de sus profesores, a veces con pequeñas modificaciones para así poder utilizar sus cantos como llamadas territoriales o de disponibilidad sexual. Al igual que los seres humanos, también tienen lateralidad cerebral izquierda. Y al igual que los seres humanos, tienen un período crucial de aprendizaje, que se detiene en la pubertad debido a la testosterona.

Con tantas semejanzas y tan claras, no es de extrañar que, por lo menos desde la época de Aristóteles, nos hayamos preguntado si el canto de los pájaros es un buen modelo para el lenguaje. Sin embargo, teniendo en cuenta lo que sabemos hoy, la conclusión es que el canto de los pájaros es solo un modelo para el habla, si es que lo es, no para el lenguaje. Como dicen Berwick *et al*. (2011: 2): «La mayoría de las propiedades sintácticas de la lengua no se encuentran en el canto de los pájaros. Las únicas excepciones se refieren a las propiedades de los sistemas de sonido del lenguaje humano». Esto es muy evidente en cualquier análisis formal del canto de los pájaros y de sus similitudes y diferencias respecto al lenguaje humano; la tabla 1 en Berwick *et al*. (2011) nos ofrece un resumen de ellas. De dieciséis propiedades clave de la sintaxis del lenguaje humano, solo dos se encuentran tanto en el canto de los pájaros como en la sintaxis del lenguaje humano: dependencia basada en la adyacencia y agrupamiento en «trozos».

Lo podemos resumir perfectamente de la siguiente manera: tanto el canto de los pájaros como el sistema de sonidos para la exteriorización de las lenguas humanas tienen dependencias basadas en la precedencia, descriptibles a través de redes de transición de estados finitos. Todas las *otras* propiedades clave de la sintaxis del lenguaje humano no están presentes en el canto de los pájaros. Estas propiedades incluyen dependencias no adyacentes ilimitadas, estructura jerárquica, dependencia estructural de reglas sintácticas y el aparente «desplazamiento» de sintagmas con copias.

Como hemos visto en el apartado anterior, las redes de transición de estados finitos que describen el canto de los pájaros son, en algunos aspectos, igual que las restricciones fonotácticas humanas, pero con un nivel de restricción todavía más alto. El canto de algunas especies de pájaros, como el pinzón bengalí, *Lonchura striata domestica*, es uno de las más complejos que se conocen. Para analizar el canto del pinzón bengalí se pueden escribir todas las posibles secuencias de notas que produce esta ave. Recordemos que la figura 4.3 (parte central) ilustraba un ejemplo concreto de grabación de un único pinzón bengalí, en el que se mostraba un sonograma «troceado» por un investigador en sílabas, etiquetadas como *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, y así sucesivamente, hasta la *j* final. La parte inferior de la figura 4.3 muestra el diagrama de transición lineal correspondiente a este canto de pájaro, que pretende reflejar todas las secuencias silábicas que puede producir el ave. Las letras individuales, como *a*, *b*, *c*, corresponden a las etiquetas de los mismos «trozos» del sonograma.

En una red de transición de estados finitos como esta, incluso los cantos a modo de bucle arbitrariamente largos tienen un carácter repetitivo especialmente trivial que es mucho más simple que el lenguaje humano. E incluso en este caso, no está del todo claro que las aves hagan «un uso infinito de medios finitos», porque podría ser que las repeticiones indefinidas no importaran realmente en el contexto etológico de la canción. (Aunque hay muchos casos en los que la repetición sí parece tener un papel como indicador de la eficacia de las hembras, no está claro que 71 repeticiones fueran diferentes de 70). Además, estas repeticiones son más simples que en la sintaxis del lenguaje humano. Los sistemas sonoros de las lenguas humanas como el navajo o el turco son aparentemente más expresivos que el canto de los pájaros, que contienen dependencias armónicas «de larga distancia», de tal manera que un sonido determinado al comienzo de una palabra debe

concordar (armonizar) con un sonido al final, con cualquier longitud de sonidos que aparezcan en medio. Este último tipo de «armonía» de larga distancia se ha confirmado totalmente en el canto de los pájaros, si bien algunas nuevas investigaciones indican que el canto de los canarios puede presentar algún tipo de estructura de correlación de largo alcance (Markowitz *et al*., 2013). Si es así, los pájaros se seguirían manteniendo dentro de las dos fuertes restricciones descritas por Heinz e Idsardi.

Un aspecto esencial en el que hemos hecho hincapié varias veces es que el canto de los pájaros nunca presenta más complejidad que esta. Aunque el canto de los pájaros presenta un troceado *lineal*, una secuencia de trinos puede ser «troceada» como una sola unidad de percepción o producción, llamado *tema*; y mientras que los *temas* pueden repetirse, no se han encontrado temas que a su vez contengan otros temas, por ejemplo, una combinación de pío y gorjeo que está inscrita a su vez en un tema de trino.[29]

Basándose en el trabajo de Berwick y Pilato (1987), Kazuo Okanoya (2004) demostró que el canto de los pájaros se puede describir mediante redes en las que es demostrablemente cierto que los adultos «enseñan» de manera eficaz a los jóvenes con cantos a modo de ejemplo que siguen patrones muy restringidos, lo que llamamos «contexto limitado». Se conocen como redes de transición de estados finitos *k-reversibles*, y las cadenas de canto resultantes, como lenguas de la red de transición de estados finitos k-reversibles. Intuitivamente, la reversibilidad *k* significa que cualquier elección no determinista en cualquier estado puede resolverse mirando hacia el contexto local anterior de los «trozos de sílabas» k. La parte de *eficiencia* de esta restricción significa que los jóvenes pueden aprender a partir de una serie de ejemplos computacionalmente eficientes. En este caso, pues, esta restricción resuelve para el canto de los pájaros una de las clásicas pre-

guntas planteadas en la lingüística: ¿Cómo se adquiere «el conocimiento de una lengua» (en este caso, el canto de los pájaros)? Si los resultados anteriores están bien encaminados entonces, en el caso del canto de los pájaros, parece que la pregunta puede responderse estrechando la clase de lenguas que han de aprenderse. La información *a priori* de que los jóvenes aprenden es que la canción que adquieren tiene que provenir de la clase de lenguas *k*-reversibles. (Puede haber también otras restricciones además de esta de los pájaros, pero es un aspecto que todavía no se ha explorado del todo).

¿De qué manera contribuye nuestro punto de vista sobre las capacidades de los pájaros y de otros animales no humanos a la historia evolutiva? Si los animales no humanos pueden hacer casi todo lo que podemos hacer nosotros, esta proximidad cercana con una única discontinuidad notoria –el Ensamble– resuelve parcialmente el dilema al que se enfrentaron Darwin y Wallace con relación a la evolución del lenguaje. Por ejemplo, Fitch (2010: 327-328) observa que el sistema auditivo y vocal de los primates parece que está esencialmente «preparado para el lenguaje»:

> […] No hay *nada* que demuestre convincentemente de mecanismos de percepción del habla que se limiten a los sonidos del habla y sean exclusivos para los oyentes humanos, y la suposición segura en la actualidad es que la percepción del habla se basa en mecanismos de procesamiento perceptivo ampliamente compartidos con otros animales. Las pequeñas diferencias que existen no parece que representen un impedimento importante para percibir los sonidos del habla, o ser de tal magnitud que hubiera supuesto un obstáculo significativo para la evolución del habla en los primeros homínidos. […] Llego a la conclusión de que la percepción auditiva de los mamíferos no humanos es perfectamente adecuada para percibir el habla y que la anatomía del tracto vocal en los mamíferos les permitiría producir una variedad de sonidos

perceptiblemente diferentes, sin duda suficientes para un sistema de comunicación oral básica.

Teniendo en cuenta esta «buena disposición lingüística» para el aprendizaje y la producción vocal, si el cerebro de los primates está realmente «sintonizado» con las propiedades fonéticas o incluso fonémicas de la lengua, pero los monos no oyen más que ruido mientras que los niños extraen material relevante para la lengua a partir del ruido, tenemos inmediatamente pruebas de algún tipo de procesamiento interno exclusivo de los bebés humanos y ausente en otros primates. Vamos a dejar a un lado este rompecabezas, por ahora.

¿Qué pasa con el Ensamble en el canto de los pájaros? Como se ha dicho, los pájaros no cantan un tema dentro de otro tema, es decir, un tema de trino que en sí mismo podría ser etiquetado como, digamos, un trino. Tampoco hay ninguna prueba experimental convincente de que los pájaros cantores puedan siquiera ser entrenados para «reconocer» los patrones jerárquicos que produce el Ensamble. Todos los intentos por conseguir aprendices vocales sofisticados, como los pinzones bengalíes o los estorninos europeos, que aprendieran patrones *no lineales* o jerárquicos han fallado de una manera u otra, como comentan Beckers, Bolhuis y Berwick (2012). Por lo general, para entrenar pájaros y lograr buenos resultados en cualquier tarea que consista en que aprendan una «lengua artificial», hacen falta muchos miles de ensayos a base de estímulos y recompensas. Por supuesto, aquí no hay ningún mapeo para una interfaz conceptual-intencional, solo la exteriorización, que es periférica al lenguaje.

Una excepción a este patrón de fracaso repetido –por lo menos a primera vista–, procede del trabajo de Abe y Watanabe (2011) , que modificaron el canto real de pinzones bengalíes para entrenamiento, y luego utilizaron solo sesenta minutos de familiarización con las lenguas de prueba. Los pájaros fueron

expuestos a patrones de notas, concretamente patrones en forma A_2 A_1 C F_1 F_2 o A_2 A_3 C F_3 F_2, y así sucesivamente, para ver si las aves podían distinguir oraciones «anidadas» bien formadas de otras mal formadas. Aquí, los subíndices de A y F indican que estos deben concordar de alguna manera, en el orden dado, y C es una nota que marca el centro del patrón. Téngase en cuenta que los patrones correctos no pueden ser generados por redes de transición finitas, si se permite que el patrón sea arbitrariamente largo. (Si los patrones son lo suficientemente cortos, pueden ser memorizados). Después se probó si las aves eran capaces de reconocer la diferencia entre patrones correctos y patrones incorrectos, como A_3 A_2 C F_2 F_4. Abe y Watanabe afirmaron que lograron realizar esta tarea, o sea, reconocer un patrón más allá de una simple concatenación lineal, un patrón jerárquico.

Sin embargo, Abe y Watanabe construyeron incorrectamente su material experimental. Resulta que los pájaros podrían haber memorizado igualmente cadenas de cinco sílabas sin utilizar ninguna computación estructural subyacente. Esto es suficiente para distinguir entre patrones de notas correctos e incorrectos (véase Beckers, Bolhuis y Berwick, 2012, para más detalles). Este problema metodológico podría solucionarse con una construcción más cuidadosa del material experimental, pero hasta ahora el experimento necesario no se ha llevado a cabo con esta corrección. En resumen, no hay ninguna prueba sólida de que los pájaros cantores hagan computaciones de «exteriorización» más allá de las expresables mediante computaciones de estados finitos *k*-reversibles, y solo exteriorización, que no es lenguaje en lo esencial. Esto responde en parte a la pregunta de «quién» en nuestro «quién es el culpable». Los pájaros cantores están descartados como sospechosos.

¿Qué pasa con otros animales no humanos? Nuestros parientes más cercanos, los primates no humanos, se han

propuesto desde hace mucho tiempo como buenos candidatos. Pero aunque pueda sorprendernos, resulta que tienen las mismas limitaciones que los pájaros cantores. Por ejemplo, ha habido varios intentos conocidos de «enseñar» a los chimpancés el lenguaje humano. Uno de los más conocidos es el proyecto Nim. Unos investigadores de Columbia intentaron enseñar la lengua de signos americana (ASL) a Nim. No lo lograron. Todo lo que Nim fue capaz de aprender realmente del ASL fue una especie de memorización –secuencias lineales (cortas) de signos–. Nim nunca progresó hasta el punto de producir oraciones incrustadas, claramente estructuradas de manera jerárquica, algo que cualquier niño normal hace a los tres o cuatro años. (Veremos enseguida cómo podemos determinarlo formalmente). Si Nim quería una manzana, recorría su catálogo de todos los signos individuales que en algún momento había asociado con manzana, y recuperaba *Nim manzana*, *manzana Nim*, *manzana cuchillo*, y así sucesivamente, tal como Laura Anne Petitto (2005: 85), una de sus cuidadoras, nos cuenta: «construía una lista de la compra» a partir de las «palabras» con las que estaba más familiarizado. Nim no llegó a alcanzar el nivel de capacidad sintáctica de un niño de tres años; no se pudo confirmar ninguna estructura jerárquica.

Pero la «competencia lingüística» que adquirió Nim fue incluso peor. Como observa Petitto, Nim no llegó a aprender palabras, y ni siquiera tenía el concepto humano de «manzana». Para Nim, una «manzana» era el objeto asociado con el cuchillo que corta la manzana y que ese guarda en el cajón, el lugar en donde estaban las manzanas, la última persona que le dio una manzana, y así sucesivamente:

> Los chimpancés no utilizan palabras del mismo modo que lo hacemos nosotros, en absoluto. […] A pesar de que los chimpancés pueden ser experimentalmente entrenados para que utilicen una etiqueta relacionada en diferentes elementos por ejemplo,

> el uso del signo de bebida delante de una manzana roja o de una manzana verde), los niños lo aprenden sin esfuerzo y sin entrenamiento explícito. […] Los chimpancés, a diferencia de los humanos, utilizan este tipo de etiquetas de una manera que parece depender en gran medida de una idea global de la asociación. Un chimpancé utilizará la misma etiqueta *manzana* para referirse tanto a la acción de comer manzanas, como al lugar donde se guardan las manzanas, a acontecimientos y locuciones de objetos distintos de las manzanas que se guardaron junto a una manzana (el cuchillo usado para cortarla). Y así todo y siempre; todo al mismo tiempo y sin aparente reconocimiento de las diferencias relevantes o de las ventajas de ser capaz de distinguir entre todo ello. Incluso las primeras palabras del bebé humano se utilizan de una manera restringida a conceptos. […] Sorprendentemente, pues, los chimpancés en realidad no tienen «nombres para las cosas». Solo tienen una mezcolanza de asociaciones sueltas sin restricciones internas como las que apunta Chomsky o categorías y reglas que las rijan. En efecto, no adquieren la palabra humana «manzana» (Petitto, 2005: 85-87).

Si reflexionamos sobre ello un momento, parece que los chimpancés son perfectos ejemplos de «aprendices asociacionistas» puros –lo que parece que tengan son conexiones directas entre estímulos externos concretos y sus signos–. No parece que consideren la manzana que están viendo en ningún sentido que dependa de la mente, como se ha analizado en el capítulo 3. Por el contrario, han almacenado una lista de asociaciones explícitas independientes de la mente, entre objetos del mundo externo y los signos del ASL. Esto está lejos de la capacidad del lenguaje de los humanos: los chimpancés carecen tanto de Ensamble como de elementos de tipo palabras como los que tenemos las personas. Si es así, los chimpancés también quedan descartados como sospechosos en nuestro «quién es el culpable».

Pero ¿cómo podemos estar seguros? Hasta hace poco, no estaba del todo claro. Sin embargo, por suerte las grabaciones de las interacciones del ASL de Nim estaban disponibles, ya que al ser un proyecto de la Fundación Nacional de Ciencias, la grabación de los archivos era una condición para la subvención.[30] Hace aproximadamente dos años, Charles Yang, de la Universidad de Pennsylvania, consiguió los datos y los analizó usando medidas teóricas de información, lo cual significó la solución de una vez por todas a si Nim había adquirido la sintaxis de los niños de dos a tres años de edad, o si lo único que hacía era reunir listas de la compra de memoria (Yang, 2013) .

Y entonces, ¿qué prueba hizo Yang? Pues muy sencilla. Lo que aprende un niño humano muy rápidamente es a combinar lo que se llaman las palabras funcionales como *la*, *el* o *un* con palabras con contenido, como *manzana* o *perrito.* El niño, pues, dice *la manzana*, o *un perrito*, o también *el perrito.* Esto equivale a seleccionar palabras *independientemente* entre estas dos categorías, y es lo que se esperaría si los niños siguiesen una regla que dice que un sintagma nominal de dos palabras es una palabra funcional seguida de una palabra con contenido. En esta situación de opciones independiente es de esperar una alta *diversidad* de oraciones distintas, porque las dos opciones pueden extenderse a todas las palabras que los niños conocen, después de corregir su frecuencia. En cambio, si los niños solo memorizan patrones de dos palabras, estos patrones simplemente serán «reproducidos» por los niños como trozos de dos palabras, sin una libre elección de palabras funcionales y de contenido; entonces, las dos palabras serían dependientes una de la otra, y veríamos menos combinaciones nuevas de palabras, la diversidad disminuiría. Ahora tenemos una prueba de fuego para ver si los niños siguen o no una regla, o bien solo memorizan: si la diversidad de las oraciones es alta, indica un comportamiento que obedece a reglas; si la

diversidad es baja, lo que hay es memorización. Ahora podemos echar un vistazo a las transcripciones reales de niños que hablan con sus cuidadores y contar ejemplos de dos palabras de esta manera, y luego compararlo con los signos de dos palabras de Nim. ¿Quién sigue las reglas y quién únicamente memoriza?

Para detectar diferencias en la diversidad, Yang representó la frecuencia esperada con relación a las producciones de dos palabras regidas por reglas frente a las producciones medidas empíricamente de los niños y Nim. Si los niños o Nim utilizaban reglas, entonces era de esperar que la frecuencia empírica fuese aproximadamente igual a la frecuencia prevista, de manera que los resultados rondarían una línea de 45 grados empezando por el origen. Esto es precisamente lo que Yang encontró en relación con la diversidad de las oraciones de niños de entre dos y tres años, así como en niños más mayores. Esto también era cierto para los corpus estándar de la lengua de adultos, como el corpus Brown. Los niños se ajustaban a la expectativa de la diversidad predicha con una correlación de 0,997. Por el contrario, las producciones de dos palabras en ASL de Nim estuvieron por debajo de la línea de 45 grados, la prueba de fuego, lo que indica una frecuencia *más baja* de lo esperado para el comportamiento sujeto a una regla –una menor diversidad y bandera roja para las combinaciones de dos signos memorizadas–. Hasta donde podemos decir, Petitto estaba en lo cierto: Nim solo recitaba listas de la compra. Por lo menos para nosotros, esto significa el punto final en cuanto a los estudios del lenguaje con chimpancés. Los chimpancés simplemente no tienen un lenguaje como el nuestro, sea la modalidad que sea. Podemos descartarlos como sospechosos de la lista de «quién es el culpable», a pesar de sus talentos cognitivos evidentes en otros campos.

¿Dónde y cuándo?

Si la «propiedad básica» es verdaderamente básica, *¿dónde* y *cuándo* apareció por primera vez? Como se observaba en el capítulo 3, se mire como se mire el origen de elementos como las palabras dependientes de la mente sigue siendo un gran misterio –para todos, incluidos nosotros–. En un reciente libro sobre la evolución del lenguaje, Bickerton (2014) también se encoge de hombros. Es fácil especular que al menos algunos de estos elementos existían antes del Ensamble, puesto que de lo contrario no habría nada que ensamblar, aunque no hay manera de estar seguros de ello. (En el capítulo 1 se habla de una alternativa en algún punto intermedio, postulada por Berwick, 2011). Tampoco hay respuestas fáciles con relación a la apariencia exacta del propio Ensamble, como observa Lewontin (1998). Solo podemos recurrir a sustitutos indirectos de lenguaje, y las pruebas arqueológicas son altamente deductivas. En un libro de texto se cita la siguiente fórmula para la identificación de modernidad en el comportamiento: «las cinco B comportamentales: cuchillas, abalorios, enterramientos, fabricación de herramientas de hueso y belleza» [*blades, beads, burials, bone tool-making, and beauty*] (Jobling *et al*., 2014: 344).

Si nos basamos en la evidencia inequívoca del comportamiento simbólico como indicador del lenguaje, podríamos considerar que los artefactos hallados en la cueva Blombos en Sudáfrica –grabados geométricos ocres y abalorios– nos proporcionan un tiempo y un lugar tan razonable como cualquier otro para la aparición del lenguaje, es decir, hace unos 80.000 años, en ese preciso lugar. Como se describe en el capítulo 1, todo apunta a una gran «desconexión» entre la aparición de cambios morfológicos en la morfología del *Homo* y otros cambios asociados conductuales o tecnológicos; la aparición de nuevas tecnologías y comportamientos sigue a largos pe-

ríodos de estasis *después* de la aparición de nuevas variantes de *Homo*. En cuanto al «cuándo», podemos precisarlo entre dos puntos en el tiempo: entre la aparición de los humanos con anatomía moderna, hace aproximadamente 200.000 años en el sur de África, y los primeros humanos con comportamiento moderno, hace aproximadamente 80.000 años. Luego vino el éxodo de África, hace unos 60.000 años, en el que los humanos completamente modernos se expandieron por el Viejo Mundo y Australia.[31] La falta de una variación profunda en la facultad del lenguaje apunta a la misma conclusión. ¿Existe alguna razón para dudar de que un niño de una tribu de Papúa Nueva Guinea, sin otro contacto humano desde hace 60.000 años, que se criara en Bastan desde su nacimiento, sería diferente de un niño nacido en Bastan? Ninguna que podamos determinar. La historia de Stebbins sobre Theodosius Dobzhansky y Ernst Mayr, mencionada en la nota 1 del capítulo 2, es una versión moderna de este experimento, y los trabajos genómicos recientes también dicen lo mismo.[32]

Así que para nosotros, el lenguaje humano y la «propiedad básica» debieron surgir entre estos dos puntos fijos en el tiempo, entre hace 200.000 años lo más pronto y hace unos 60.000 años lo más tarde, pero seguramente bastante antes del éxodo de África, dada las muestras simbólicas de la cueva de Blombos de hace 80.000 años. Seguro que si aparecen más pruebas, el momento podría remontarse, tal vez más cerca de los 200.000 años. Resulta que esto no queda tan lejos de la línea de tiempo trazada por lean Aitchison, en la figura 5.4 de su libro *Seeds of Language* (1996: 60), en la que se establece que «en algún punto entre 100.000 y 75.000 [años] [antes del presente] tal vez, el lenguaje alcanzó una fase crucial de sofisticación», si bien su punto de partida es anterior, hace 250.000 años.

¿Cómo encajan los neandertales en este panorama? Como se ha señalado en el capítulo 1, la respuesta a esta pregunta es

muy controvertida, ya que la prueba relevante es sumamente deductiva. Recordemos que la división básica más antigua entre nosotros y los neandertales se fecha hace unos 400.000-600.000 años, y evidentemente los neandertales emigraron a Europa no mucho tiempo después, lo cual significa que la aparición de humanos anatómicamente modernos en el sur de África que llegaron hasta la cueva de BIombos se produjo, por lo que sabemos, sin neandertales a la vista. Especímenes neandertales de la cueva del Sidrón, en España, han sido analizados para ver si su ADN *FOXP2* contiene los mismos dos cambios recientemente derivados como en los humanos modernos (Krause *et al*., 2007); los mismos dos cambios que según Enard *et al*. (2002) están bajo selección positiva en los seres humanos. (Recordemos que estos *no* son los cambios asociados a la dispraxia verbal relacionada con el daño al *FOXP2*). Dado que los especímenes neandertales del Sidrón ahora se han fechado en hace aproximadamente 48.000 años (Wood *et al*., 2013), antes del momento que se sabe que los humanos modernos llegaron a España, la posibilidad de cruce entre humanos modernos y neandertales que resultara en un flujo de genes del ADN *FOXP2* moderno a los neandertales debe descartarse. Por lo menos desde este punto de vista, la variante humana del *FOXP2* descrita por Enard *et al*. está compartida con los neandertales.

Pero ¿los neandertales también comparten el lenguaje humano, en concreto la «propiedad básica» y la sintaxis del lenguaje humano? No está claro, pero no hay ninguna prueba real en los neandertales de la rica vida simbólica asociada a *Homo sapiens* hace 80.000 años. Dada la evidencia de ADN antiguo neandertal, la fecha estimada para la aparición del barrido selectivo que dio lugar a la variación derivada común a los seres humanos y los neandertales se ha calculado que precede al antepasado común de humanos modernos y neandertales, hace 300.000-400.000 años, mucho antes del

tiempo calculado por Enard *et al*. (2002) para este acontecimiento selectivo. Hay otras incoherencias; recordemos del capítulo 1 que Pääbo cree que hubo al menos dos acontecimientos muy distantes entre sí, separados en la historia evolutiva del *FOXP2*. Maricic *et al*. (2013) argumentan que el *FOXP2* de neandertales y humanos difiere en un tramo regulador funcionalmente importante diferente de la región codificadora de ADN que Enard *et al*. (2002) decía que se encontraba bajo selección. El problema es que si se adoptan enfoques convencionales, la «señal» de la selección se disipa muy rápidamente, en cuanto retrocedemos 50.000-100.000 años. El resultado es que estos hallazgos infieran o no selección, así como las fechas calculadas de selección, todavía son objeto de debate. Zhou *et al*. (2015) han propuesto un nuevo enfoque para superar fluctuaciones (desconocidas) en el tamaño poblacional, y aun así reconocer la selección positiva, pero el método todavía no se ha confirmado (véase también la nota 11 del capítulo 1). En resumen, estamos de acuerdo con Nick Patterson, investigador de la evolución del genoma y especialista en estadística, que desde hace mucho tiempo se ha dedicado al trabajo con ADN antiguo en el Broad Institute (comunicación personal): Hasta ahora no hay signos que sean *inequívocos* de la selección alrededor del período de tiempo crucial en que los neandertales se separaron del linaje principal que en última instancia se convirtió en nuestros antepasados; lo que hay es demasiado ruido.

Además, como hemos dicho antes, algunos genes, aparentemente fundamentales, en el desarrollo del sistema nervioso también difieren entre humanos y neandertales. Somel, Liu y Khaitovich (2013: 119) señalan que «cada vez hay más pruebas de que el desarrollo del cerebro humano se reconfiguró fundamentalmente debido a diversos acontecimientos genéticos que se produjeron dentro del corto espacio de tiempo entre la división de humanos y neandertales y la aparición de los hu-

manos modernos». Es el caso de ciertos cambios regulatorios que dan lugar a un aumento de la neotenia y a una trayectoria diferente del desarrollo del cráneo en los seres humanos en comparación con los neandertales (Gunz *et al*., 2009), con cerebros humanos con una forma más globular y un período más largo de desarrollo durante la niñez que los neandertales. Este último aspecto es interesante, ya que aunque los neandertales tenían cerebros más grandes de promedio que los humanos modernos, la distribución del volumen craneal es diferente: los neandertales tienen una gran «protuberancia occipital» en la parte posterior de la cabeza, mientras que los humanos modernos, no; en los humanos, el aumento de la capacidad craneal se desplaza a la parte delantera. Estos aspectos han sido debatidos por algunos para apuntar hacia una diferencia entre neandertales y humanos modernos, en la que los neandertales tendrían más masa cerebral dedicada a la percepción visual y al uso de herramientas (la protuberancia occipital) (Pearce *et al*., 2013).

Si atendemos a posibles agentes representantes del lenguaje, la situación se oscurece aún más. No es más que una afirmación que para llevar a cabo actividades como el trabajo complejo en piedra, el control del fuego, el vestido, la pintura y cosas similares se necesite el lenguaje. Puede que nosotros sepamos hacerlo todo, pero no significa que los neandertales tuvieran necesariamente todas las características que concurren en nosotros solo porque supieran hacer algunas de esas actividades. Consideremos tres de las B mencionadas con relación a la muestra de la actividad simbólica: enterramientos, abalorios y herramientas de hueso. Se puede interpretar las pruebas de «entierros» como se quiera. No existe nada que pueda ser caracterizado convincentemente como «ajuar de tumba» neandertal. Más indicativo es que, según parece, los neandertales se comieron los unos a los otros de la manera más escalofriantemente prosaica, se mire por donde se mire

(Zafarraya, El Sidrón, etcétera), sin que por supuesto atribuyesen ningún significado especial a este comportamiento, ni siquiera al uso de cráneos humanos para la fabricación de herramientas.

Según han dicho algunos, las pruebas de actividad simbólica en forma de colgantes de piedra proceden de la cueva châtelperroniense de Arcy. Sin embargo, la asociación de restos neandertales, en su mayoría dientes, con capas châtelperronienses en Arcy-sur-Cure, ha sido puesta en cuestión más recientemente sobre la base de pruebas que indican una posible mezcla de sedimentos arqueológicos (Higham *et al*., 2011). Lo que implica es que el châtelperroniense, al igual que el resto del Paleolítico superior, puede que sea un producto de los humanos modernos, y que la presencia de algunos restos neandertales en estas capas no significa que los neandertales hicieran los artefactos châtelperronienses (Pinhasi *et al*., 2011; Bar-Yosef y Bordes, 2010). Mellars (2010: 20148) resume esta ambigüedad claramente:

> No obstante, la implicación fundamental e ineludible de los nuevos resultados de datación de la Grotte du Renne es que el único y más impresionante pilar, y por ello el más ampliamente citado hasta ahora, en el que se basaban las pruebas de la presencia de comportamiento complejo «simbólico» entre las últimas poblaciones de neandertales en Europa, ahora se ha derrumbado de manera efectiva. Sigue siendo objeto de debate si existen otras pruebas de comportamiento avanzado y explícitamente simbólico de este tipo confirmadas en otros yacimientos neandertales en Europa. […] Una cuestión crucial que debe plantearse ineludiblemente en este contexto es por qué, si el comportamiento explícitamente simbólico era una parte integral del repertorio cultural y comportamental de los neandertales europeos, hay tan pocas pruebas reales (o incluso reivindicadas) de ello en todo el período de 250.000 años de ocupación neandertal en Europa, que

se extiende por una amplia gama de entornos muy contrastados, y en un espacio geográfico de más de 2.000 millas.

Dado el polémico debate sobre las pruebas, nosotros creemos que hoy no hay ninguna razón para adoptar la conclusión más radical de que los neandertales poseían algo parecido a la «propiedad básica», ni siquiera parecido a los rudimentos del lenguaje simbólico.

¿Podríamos utilizar técnicas genéticas poblacionales contemporáneas para calcular cuando apareció el lenguaje estudiando algunos de los genes implicados? Esto es exactamente lo que Enard *et al*. (2002) hicieron en el caso del *FOXP2*: crearon un modelo de «barrido selectivo» (véase también capítulo 1, nota 10). Esta es la idea. La selección hace desaparecer la variación del ADN. Eso es lo que hace un tamiz: separar una mezcla original de oro de la escoria para que quede solo el oro. Ahora bien, la suciedad residual que se pega al oro puede ser «barrida» –las regiones genómicas que flanquean la que está bajo fuerte selección–. Así, al final de un combate selectivo, esperaríamos encontrar un tramo largo e invariable de ADN centrado en el lugar de selección (el oro), con menor variación a ambos lados de la región seleccionada (los polizones arrastrados con el oro). Con el tiempo, de generación en generación, este bloque uniforme de baja variación que rodea las inmediaciones de la región seleccionada decae a una tasa regular debido al proceso normal de recombinación sexual, el proceso de meiosis que rompe el ADN de un cromosoma de uno de los progenitores, pegándose al ADN del otro progenitor. El área seleccionada en sí no tenderá a destrozarse, al menos no de forma viable, ya que tiene que permanecer entera para ser funcional (cualquier tramo genómico que se destroce aquí no pasará a las próximas generaciones). El resultado es un deterioro contrarreloj de lo barrido previamente por las regiones uniformes que flanquean

el espacio genómico seleccionado. Todo esto da lugar a un patrón predecible de decadencia observable en la variación que hoy se puede medir. Podemos usar dichas medidas para extrapolar hacia atrás en el tiempo y calcular el número de generaciones que tiene que haber pasado desde el momento de la selección, haciendo suposiciones sobre la tasa de decadencia causada por la recombinación, una estimación de la fuerza original de la selección, y los posibles cambios poblacionales (ya que aumentos o disminuciones de la migración también pueden cambiar la variación general del ADN de la población). No tiene que sorprendemos, todo esto vuelve a ser un ejercicio de elaboración de modelos probabilísticos, porque no podemos estar seguros de la fuerza de la selección, de la tasa de recombinación o de los cambios poblacionales.

Hay ruido, y lo mejor que podemos hacer es recurrir a un cálculo estadístico. Terminamos con un calculo estimado del momento de la selección, un determinado número de generaciones en el pasado, junto con una medida de nuestra confianza en ese intervalo. Suele ser bastante grande, lo que refleja nuestra incertidumbre respecto a los valores para la selección, etcétera. Enard *et al*. (2002) estimaron que el intervalo de confianza del 95% más probable para el barrido selectivo de *FOXP2* era de 120.000 años. Más recientemente, Fitch, Arbib y Donald (2010) han propuesto el cálculo de barrido como un método general para demostrar hipótesis acerca de la evolución del lenguaje. Sugieren que podemos calcular las diferentes edades de los barridos selectivos asociados con genes que sustentan el lenguaje, entre los que el *FOXP2* es el primero, y muchos más que siguen, creando una lista de genes candidatos según lo dicho en el capítulo 1. Como ejemplo, señalan que *si* los genes del aprendizaje vocal fueron «barridos selectivamente» en una etapa temprana, y los genes de la «teoría de la mente» en una etapa tardía, entonces podríamos usar las fechas estimadas de estos barridos para

decir que una teoría que supusiera que el aprendizaje vocal fue primero encajaría con los hechos del barrido selectivo mejor que una en la que «la teoría de la mente» llegara primero. Naturalmente, como destacan, lo mejor es tener un conjunto de genes candidatos subyacentes a cada supuesto modelo, con una fecha de barrido selectivo estimada para cada uno.

Al menos por ahora, cuesta ver cómo este enfoque podría ganar recorrido, aunque, desde luego, nada se puede dar por seguro. Por un lado, los barridos selectivos fuertes parecen ser relativamente raros por razones de principio, como indican Coop y Przeworski (Jobling, 2014: 204). Los barridos selectivos no recogen todos los acontecimientos adaptativos interesantes, ni siquiera la mayoría de ellos. Además, la selección se pierde con demasiada facilidad a medida que retrocedemos en el tiempo y sus efectos sobre la variación del ADN se ocultan tras los causados por la migración, por los efectos demográficos, como la mezcla de poblaciones, por la expansión y contracción, y por la recombinación sexual. Hace poco que Zhou *et al*. (2015) han introducido un método con el que se podrían superar algunas de estas dificultades; es demasiado pronto para decirlo en este momento. Pero entonces llegamos al punto más difícil de todos: como ellos reconocen, este método supone que tenemos un conocimiento bastante bueno de la interacción genética que resulta en un fenotipo concreto.

En resumen, nuestro mejor cálculo para el «cuándo» y el «dónde» es algún momento entre la aparición de los primeros humanos anatómicamente modernos en el sur de África, hace unos 200.000 años, hasta otro momento antes del último éxodo desde África, hace unos 60.000 años (Pagani *et al*., 2015), pero es probable que antes de hace 80.000 años. Eso nos da cerca de 130.000 años, o aproximadamente 5.000-6.000 generaciones de tiempo para el cambio evolutivo. No es en «un abrir y cerrar de ojos de una generación», como

algunos han deducido (incorrectamente), pero tampoco es a escala de eones geológicos. Es el tiempo suficiente, dentro de lo que lo Nilsson y Pelger (1994) calcularon que era el tiempo necesario para la evolución completa de un ojo de vertebrado a partir de una sola célula, incluso sin tener que recurrir a ningún efecto «evo-devo».

¿Cómo?

Nos quedamos con dos preguntas finales en nuestra historia de misterio: cómo y por qué. En este apartado proponemos una respuesta (especulativa) al «cómo» y dejamos el «porqué» para las conclusiones. El «cómo» es necesariamente especulativo, ya que en realidad no sabemos cómo está implementada la «propiedad básica» en los circuitos neuronales. De hecho, como hemos subrayado al hablar sobre el «qué», no tenemos un buen conocimiento sobre la gama de posibles implementaciones para cualquier tipo de computación cognitiva. Más rudimentario es todavía lo que sabemos sobre cómo los conocimientos lingüísticos o «gramáticas» se pueden implementar en el cerebro. Debemos damos cuenta de que, incluso en el caso infinitamente más simple en el que tenemos un conocimiento bastante completo de los cálculos que han de hacer los insectos para navegar –el rumbo y la integración de rutas– y aun reforzado este por el acceso a la manipulación experimental y genética que es imposible llevar a cabo en los seres humanos, aún no sabemos con detalle cómo se implementa esa computación (Gallistel y King, 2009).

Vamos a dejar a un lado estas preocupaciones reales y a especular de todos modos, porque los investigadores han aprendido algunas cosas sobre la neurobiología del lenguaje e incluso un esquema especulativo podría esbozar líneas de investigación productivas. Seguiremos el trabajo de Friederici

y sus colegas (Friederici, 2009; Perani *et al*., 2011), que han hecho esfuerzos concertados para relacionar conocimientos lingüísticos modernos sobre el cerebro, así como los puntos de vista críticos de Michael Skeide (comunicación personal). Otro examen reciente que reúne la investigación de Friederici y colegas y se refiere a muchos de los mismos aspectos se puede encontrar en Pinker y Van der Lely (2014).

Pero antes de comenzar queremos decir unas pocas palabras sobre un camino en concreto que no vamos a recorrer para responder al «cómo» –un camino muy trillado–. Es «fácil» responder a la pregunta de cómo llegó a existir el Ensamble si suponemos que es exactamente lo mismo que las capacidades computacionales previas en otros animales, o que es parasitario en una capacidad computacional preexistente. Hemos demostrado que la primera opción –la adoptada por Bornkessel-Schlesewsky o Frank junto con muchos otros que piensan que el lenguaje humano es «lo mismo» que un procesamiento secuencial estándar– no parece muy probable. En cuanto a la opción parasitaria… las explicaciones son numerosas. Para otros, el Ensamble cabalgó a lomos de…, bueno, de casi todo excepto de lo que hemos hablado en estas páginas: planificación motora jerárquica; gestos; música; navegación compleja de la era pre-Google o su ensayo; almacenamiento complejo de alimentos; lenguaje de pensamiento composicional; una diferencia cualitativa en los planes humanos; atado de nudos; o incluso, y no es ningún chiste, patatas al horno. (La historia es que nosotros, pero no otros animales, logramos tener más copias de genes para construir las enzimas gracias a digerir más fácilmente el almidón cocinado, lo cual impulsó la ampliación del cerebro después de la invención del fuego; véase Hardy *et al*., 2015). La historia no nos acaba de convencer.

Recordemos que el Ensamble utiliza los siguientes componentes: 1) la operación de Ensamble propiamente dicha, una operación composicional básica; 2) elementos equivalentes

a palabras o representaciones sintácticas previamente construidas, y 3) un espacio computacional donde se produce la computación o computaciones. ¿En qué lugar del cerebro podría ocurrir todo esto?

Según la tradición clásica, las regiones cerebrales conocidas como áreas 44 y 45 de Brodmann (área de Broca, BA 44 y BA 45 en la figura 4.4, situada en la parte dorsal) se han asociado con la computación y los déficits sintácticos (afasia de Broca), junto con otras capacidades funcionales. Los metaanálisis apuntan a la zona 44, la subarea opercular, como la zona que participa en el procesamiento sintáctico a diferencia de otras áreas (Vigneau *et al*., 2006), pero el sistema es claramente más detallado. Una segunda área bien conocida relacionada con el lenguaje cubre las regiones ventrales, de color verde en la figura 4.4, el área de Wemicke. Desde el siglo XIX sabemos que estas áreas relacionadas con el lenguaje están conectadas por las principales fibras nerviosas (Dejerine, 1895). Nosotros postulamos (especulativamente) que los elementos equivalentes a palabras, o por lo menos sus características tal como las usa el Ensamble, se almacenan de alguna manera en la corteza temporal medial como «lexicón», aunque, como hemos mencionado en el capítulo 1, no está claro cómo funciona el almacenamiento de elementos en la memoria, ni tampoco su recuperación.

Hoy el IRM [Resonancia magnética] de difusión nos ha proporcionado información adicional acerca de las fibras nerviosas que conectan estas áreas, así como un conjunto e interesantes pruebas de desarrollo y comparativas con primates no humanos. A partir de esto, empieza a emerger una imagen que invita al análisis de la evolución y que concuerda con los aspectos del Ensamble a los que aludíamos más arriba, como sugiere Skeide.

La figura 4.4 muestra las posiciones de los tramos de fibras nerviosas de largo alcance que conectan las regiones

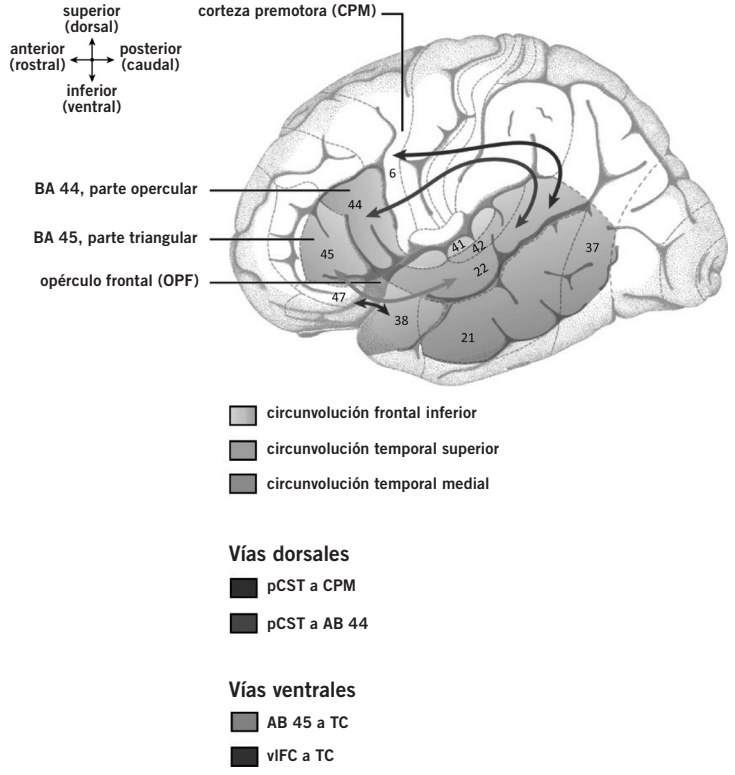

Figura 4.4 (lámina 2)

Regiones relacionadas con el lenguaje y fibras conectoras en el cerebro humano. Se muestra el hemisferio izquierdo. Abreviaturas: CPM, corteza premotora; CTS, corteza temporal superior; p, posterior. Los números indican las áreas de Brodman (AB) definidas citoarquitectónicamente. Hay dos vías dorsales: una que conecta pCST con CPM (rojo oscuro) y otra que conecta pCST con AB 44 (azul). Las dos vías ventrales que conectan BA45 y la corteza ventral inferior frontal (CVIf) con la corteza temporal (CT) también se cree que pueden estar relacionadas con el lenguaje. Berwick *et al*., 2013. «Evolution, brain, and the nature of language». *Trends in the Cognitive Sciences* 17 (2): 89-98. Con la autorización de Elsevier Ltd.

relacionadas con el lenguaje, las dorsales y las ventrales, en el cerebro humano adulto. Como observan Perani *et al*. (2011, 16058), existen dos vías dorsales, «una que conecta la corteza temporal superior medial a posterior con la corteza premotora [de color morado en la figura 4.4] y una que conecta la corteza temporal con el área de Broca [de color azul en la figura 4.4]. Se ha [sugerido] que [las] dos pueden servir para realizar diferentes funciones, la primera encargándose del mapeo auditivo-motor de […] y la segunda ayudando en el procesamiento de la sintaxis de oraciones». También hay dos vías ventrales que establecen conexión entre la región donde se supone que está el «lexicón» y la región dorsal frontal. La idea es que estos tramos de fibras dorsales y ventrales juntas forman un «anillo» que traslada información desde el lexicón hasta las áreas en la cara dorsal donde es utilizada por el Ensamble. La idea clave es que este «anillo» de fibras nerviosas debe estar en su sitio para que funcione el procesamiento sintáctico.

Existen algunas pruebas de desarrollo que sugieren que el procesamiento sintáctico requiere algo parecido a esto. La figura 4.5 (Perani *et al*., 2011) muestra cómo estos tractos de fibras maduran con el tiempo, entre un recién nacido y un adulto. En (A) las figuras muestran la conectividad en los adultos, en los dos hemisferios, izquierdo y derecho, mientras que en (B) se muestra la conectividad del recién nacido. En los adultos (A), el «anillo» que conecta la zona ventral y la zona dorsal es completo, y las partes verdes, amarillas y azules indican las conexiones ventral y dorsal mediante las fibras. No obstante, al nacer (B) faltan las conexiones azules; aún no están mielinizadas. Estas son las conexiones con el área de Broca. Es como si al nacer el cerebro no estuviera bien «cableado» para llevar a cabo el procesamiento sintáctico. Estos tractos de fibras maduran y se vuelven funcionales hacia los dos o tres años, lo cual concuerda con lo que sabemos so-

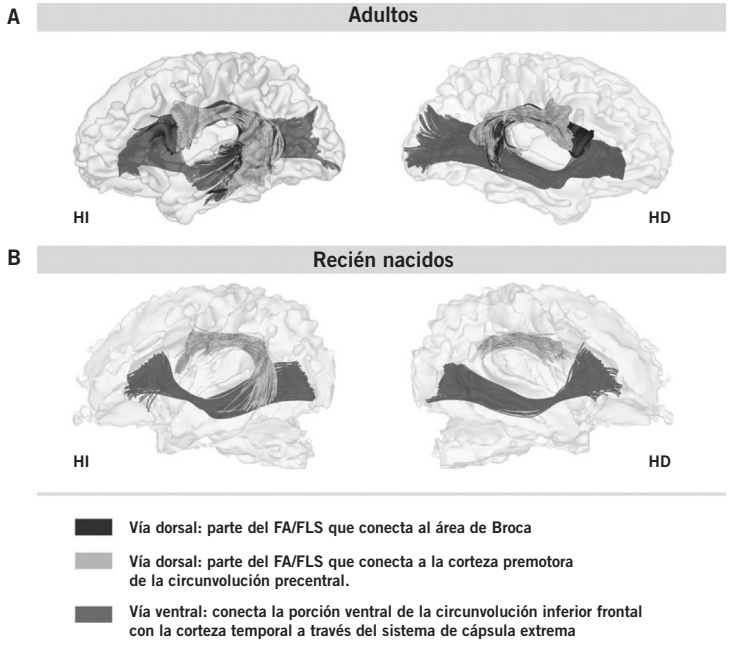

Figura 4.5 (lámina 3)

Conectividad dorsal y ventral en los adultos frente a recién nacidos, según lo determinado por el IRM tensor de difusión. FA/FLS =fascículo arqueado y fascículo longitudinal superior, (A): tractos de fibras en adultos del hemisferio izquierdo (HI) y el hemisferio derecho (HD). (B): tractos de fibras de recién nacidos de las conexiones comparables. Las vías dorsales que se conectan con el área de Broca no están mielinizadas al nacer. La direccionalidad se dedujo a partir de semillas en el área de Broca y en la circunvolución precentral / corteza motora. Perania *et al*., 2011. «Neural language networks at birth». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (38): 16056–16061. Con la autorización de *PNAS*.

bre el desarrollo del lenguaje. En cambio, como hemos visto desde el principio de este libro, al nacer las vías responsables del procesamiento auditivo ya son funcionales, y durante el primer año de vida los niños adquieren el sistema de sonido de su lengua.

Las pruebas comparativas dicen básicamente lo mismo. La figura 4.6 muestra los tractos de fibras correspondientes en el cerebro de un mono del Viejo Mundo, el macaco. Concretamente, destaquemos que el anillo completo desde el lado dorsal al ventral en la parte superior, entre la fibra AF y la STS, no está. Las dos fibras están muy cerca de conectarse entre sí. Casi pero sin premio, como se suele decir. Lo mismo

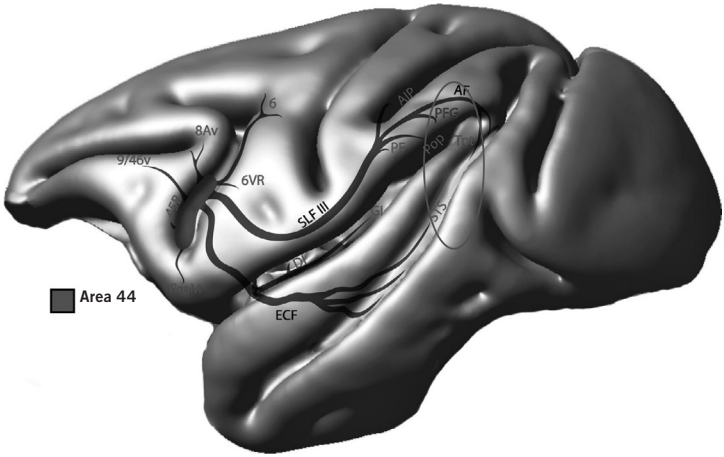

Figura 4.6 (lámina 4)

Las vías de fibras nerviosas de los macacos de las áreas de Brodmann 44 y 45B, determinadas a través del IRM tensor de difusión. Obsérvese la distancia entre la vía dorsal-ventral FA y la vía ventral STS, con un círculo rojo. Frey, Mackey y Petrides, 2014. «Cortico-cortical connections of areas 44 and 45B in the macaque monkey». *Brain and Language* 131: 36-55. Con la autorización de Elsevier Ltd.

ocurre con los chimpancés. Especulando, junto con la prueba del desarrollo humano, lo que esto sugiere es que para hacer posible la «propiedad básica» es necesario un «anillo» completamente conectado que forme un espacio de trabajo donde pueda darse la operación de Ensamble.

¿Y en cuanto a la evolución? Es casi literalmente un «eslabón perdido». Aunque no podemos estar seguros, si fuera verdad que la sintaxis humana necesita un «anillo» completamente cableado, entonces la idea de que algún «pequeño recableado del cerebro» dio lugar a un sistema sintáctico en pleno funcionamiento con el Ensamble podría no estar tan lejos de la realidad. Un pequeño cambio genómico en un factor de crecimiento para una de las fibras, junto con la orientación adecuada del tracto de la fibra, puede bastar, y sin duda hay tiempo suficiente para ello. Esto también concuerda con el pequeño cambio neural al que se refieren Ramus y Fisher (2009), que podría tener grandes consecuencias fenotípicas, sin que fuera necesaria mucha evolución, ni tampoco mucho tiempo.

¿Porqué?

Y llegamos a la última pregunta del misterio, la que motivó a Wallace: ¿Por qué? ¿Por qué los seres humanos tienen lenguaje? Hemos subrayado en varias ocasiones a lo largo de este libro que no creemos que la «comunicación» fuera lo que actuó de impulsor. Otros han sugerido la planificación, la navegación, una «teoría de la mente y otras mentes», etcétera, como ya hemos señalado anteriormente. En nuestra opinión, todo esto se subsume más fácilmente bajo el titular del lenguaje como una «herramienta mental interior», la interfaz conceptual intencional, que sigue siendo crucial. En los capítulos 2 y 3 hablábamos de la prioridad funcional que

tiene la interfaz. Y en un principio al menos, si no había exteriorización, el Ensamble sería solo como cualquier otro rasgo «interno» que impulsó la ventaja selectiva, internamente, por medio de una mejor planificación, inferencia, etcétera.

Por lo menos, según indican algunas pruebas experimentales, el lenguaje desempeña exactamente este papel. Spelke y sus colegas han hecho una serie de experimentos para determinar cómo los niños y adultos integran la información geométrica y no geométrica, y cómo se relaciona esto con el lenguaje (Hermer-Vazquez, Katsnelson y Spelke, 1999). Estos autores han usado el siguiente paradigma. Unos individuos adultos ven un objeto colocado en una esquina de una habitación geométricamente asimétrica cuyas paredes son todas blancas. A continuación se oculta el objeto. Los individuos cierran los ojos y empiezan a dar vueltas hasta que están desorientados. Entonces abren los ojos y se les dice que busquen el objeto escondido. Según parece, todos los sujetos son capaces de utilizar la asimetría geométrica de la habitación para reducir la búsqueda: si el objeto está escondido en la pared larga de la izquierda, buscan solamente en las dos esquinas con la pared larga a la izquierda. Parece ser que el uso de esta pista geométrica no es consciente. Ahora bien, si el experimentador añade una sola pista no geométrica que rompa más la simetría, como una pared azul, entonces los sujetos combinan la información geométrica y no geométrica y van directamente a la única esquina que oculta el objeto escondido.

¿Y qué hacen los niños? Resulta que si los niños realizan esta prueba antes de haber adquirido la lengua, son incapaces de integrar y utilizar la información de que la pared es de color azul. A los cuatro o cinco años, con un dominio de la lengua casi pleno, lo consiguen. Del mismo modo, si se pide a los sujetos adultos que realicen una tarea lingüística que «ensombrezca» la búsqueda del objeto oculto –se les pide

que repitan un fragmento que están escuchando–, entonces esta interferencia lingüística los reduce al nivel de los niños que todavía no han adquirido el lenguaje. Una explicación de este comportamiento, por encima de la pura sobrecarga de memoria, es que el lenguaje es la *lingua franca* que une las diferentes representaciones de los «módulos» geométricos y no geométricos, exactamente como lo haría una «herramienta mental interna». El ser capaz de integrar una serie de pistas perceptivas y razonar sobre ellas –es el animal encima o debajo de la roca– parece tener ventajas selectivas definidas. Un rasgo de este tipo podría ser transmitido a los descendientes, y llegar a dominar en un pequeño grupo procreativo: el escenario evolutivo que hemos imaginado. El resto es, literalmente, nuestra historia, la historia exclusivamente nuestra como especie moderna.

Así pues, una última cita de Darwin (1859: 490), una cita conocida, que parece que está en armonía con la evolución del lenguaje: «A partir de un principio tan simple, han evolucionado, y siguen evolucionando, un sinfín de formas tan bellas y maravillosas».

NOTAS

1. Véase Chomsky, 2010, que planteó por primera vez la cuestión del dilema de Wallace sobre la evolución del lenguaje y la mente. Véase Hornstein, 2009, sobre «El problema de Darwin». Wallace 1869 suele ser considerado como una de sus primeras explicaciones de esta dificultad, y en esta obra presenta la solución de ubicar el origen del lenguaje y la mente fuera del ámbito del darwinismo biológico convencional (a pesar de que imaginó una solución transdarwiniana del problema). Este hilo es recogido en Bickerton 2014; el capítulo 1 de este libro se titula «Wallace's Problem».
2. Para una versión actualizada, véase Berwick, 2011.
3. La GU no debe confundirse con los llamados «universales lingüísticos», observaciones que se refieren en general a la lengua, como los universales de Greenberg en que que sujeto, verbo y objeto aparecen en un determinado orden en todas las lenguas del mundo. Los universales lingüísticos pueden proporcionar datos extremadamente valiosos sobre el lenguaje humano. Sin embargo, como suele pasar a menudo con las generalizaciones relativas a fenómenos de superficie, a menudo tienen excepciones. Con frecuencia, las propias excepciones pueden ser muy útiles como guías para la investigación, como en las ciencias en general.
4. La idea de que esta distinción neurobiológica sustenta la diferencia entre los animales vocales y los no vocales generalmente se denomina hipótesis de Kuypers-Jürgens, según Kuypers (1958) y Jürgens (2002).
5. En concreto, este cambio fue una inversión de una longitud de 900 kilobases de ADN en el brazo largo del cromosoma 17. (El segundo cromosoma 17 que tenían estas mujeres era normal, por eso las mujeres eran *heterocigotas* para esta inversión). Es decir, en lugar de que el ADN corriera en la dirección normal, este trozo «giraba». Las mujeres que tenían dos copias normales del cromosoma 17 eran homocigóticas para el estado no invertido, no presentaban este aumento en el número de hijos.
6. No es sencillo definir la «eficacia», y equiparar la eficacia darwiniana a una definición como «tasa de reproducción» presenta muchas dificultades; de aquí las comillas. Véase Ariew y Lewontin (2004) para más detalles. Los autores del es-

tudio supusieron que todos los hijos tenían las mismas posibilidades de llegar a la madurez y de reproducirse, independientemente de quiénes eran sus madres.

7. Por ejemplo, se podría suponer que el número de descendientes de un individuo determinado que tiene el gen «más eficaz» tiene una distribución de Poisson con una media de 1 + *s*/2,donde s es la ventaja de la eficacia mencionada en el texto, por lo que el número de descendientes podría ser 0, 1,…, ∞. Entonces, la probabilidad de que haya *i* descendientes es

$$e^{-\mu}\mu i/i\ !$$

donde e es el número de Euler, la base de los logaritmos naturales. Si suponemos una ventaja de eficacia de 0,2, la media de Poisson correspondiente sería, pues, 1 + 0,1. La probabilidad de que este gen más eficaz tuviera Odescendientes en cualquier generación en particular sería $e^{-1.1}1/1$ o aproximadamente 0,33287, más de un tercio. Téngase en cuenta que un gen completamente «neutro», al no tener ninguna ventaja selectiva, tendría una probabilidad que no es apreciablemente mayor que esta de l/*e* o 0,36787. (Véase Gillespie, 2004, 91-94, para un debate adicional sobre este importante aspecto). Uno de los fundadores de la Síntesis Moderna, Haldane (1927), fue uno de los primeros en considerar este tipo de cálculos «nacimiento-muerte».

8. Como se ha dicho , esto no quiere decir que no se hayan producido acontecimientos evolutivos importantes después de la aparición de pigmento-más-células duplicadas. Nos hemos saltado la historia, fascinante y extremadamente rica, de la evolución molecular de la opsina, revelada con todo detalle gracias a los datos genómicos comparativos, incluyendo la ganancia y la pérdida de las opsinas para la visión del color, cómo los cambios de opsina alteran el funcionamiento en los diferentes contextos de especies, y cosas similares. Del mismo modo, los cambios evolutivos en el «cuerpo de la cámara y en la lente» y cómo estos se pusieron en marcha es un tema importante por propio derecho, pero no afectan a nuestro foco de interés principal. Quizás los lectores estén interesados también en el conocido cálculo «pesimista» del tiempo necesario para que se desarrolle un ojo de los vertebrados a partir del sistema de dos células, a cargo de Nilsson y Pelger (1994).
9. Chatterjee *et al*., 2014 presentan otra forma de calcular el tiempo necesario para encontrar las secuencias genómicas que codifican nuevas funciones biológicas. Los autores demuestran que, en general, el tiempo necesario para la adaptación es excesivamente largo, dado el vasto espacio de posibles secuencias genómicas donde buscar y los aproximadamente 109 años disponibles desde el origen de la vida en la Tierra. Esto resulta ser exponencial en la longitud de la secuencia genómica que experimenta la adaptación, es decir, la longitud de la secuencia del ADN en cuestión, y la duración media de los genes bacterianos es de alrededor de 1.000 nucleótidos. Para que esto se reduzca a una cantidad «manejable» de tiempo, es decir, polinomial en la longitud de la secuencia, indican que se puede imponer la restricción de que la secuencia genómica inicial puede ser «regenerada», es decir, es fácil volver al punto de partida para la búsqueda. Este resultado tiene la interpretación biológica natural de que los puntos de partida deben estar «cerca» de las secuencias objetivo, en el sentido de que si se duplica una secuencia genómica, no estaría tan lejos de un objetivo adaptativo. Téngase en cuenta que esto re-

futa la creencia popular de autores como Steedman, según el cual «La evolución tiene recursos prácticamente ilimitados, con un número de procesos limitado únicamente por los recursos físicos del planeta, y con un tiempo de procesamiento limitado únicamente por la existencia continuada de este último. En esencia, funciona intentando todas las variaciones posibles en todas las variantes viables has ta ahora» (2014, 3). Esto es falso. De hecho, la evolución ha explorado solo una parte muy muy pequeña del «espacio de secuencias» de la variación genómica y morfobiológica, como indica la investigación de Martin Nowak. En cambio, ha vuelto varias veces a los problemas que ya había resuelto antes. Una de las maneras de hacer esto, de acuerdo con Nowak, es a través de la duplicación genómica. Hace mucho tiempo que se ha reconocido el valor de la duplicación genómica como una forma de regenerar puntos de partida para buenas soluciones evolutivas inicialmente; esta es una de las principales formas propuestas para la adquisición de una nueva función biológica. La duplicación de ADN no está sometida a la restricción de selección y puede ser alterada libremente para «dar caza» a la nueva función objetivo, ya que tiene una contraparte duplicada que toma el relevo. Véase también Ohno (1972).

10. Si estos dos cambios humano/neandertal eran de verdad tan importantes funcionalmente, sería de esperar que «pegaran» durante la recombinación sexual en la reproducción, pero no es eso lo que encontraron Ptak *et al*. (2009). Además, cuando se intenta «alinear» el momento en que estas dos regiones, Neandertal-y-*FOXP2*-específico-humano, se originaron, las fechas no concuerdan. El resultado es que la posición, la naturaleza y el momento de la evolución del *FOXP2* siguen siendo objeto de debate. De acuerdo con algunos trabajos recientes (Maricic *et al*., 2013), las variantes humana y neandertal del gen *FOXP2* difieren en las regiones reguladoras cruciales que al parecer han sido objeto de recientes barridos selectivos en los seres humanos. Por esto, las dos posiciones de aminoácidos que antes se pensaba que participaban en un barrido selectivo dentro de esta región génica en el antepasado común de los seres humanos y los neandertales no estaban implicadas en ello. En cambio, estaba implicada una región diferente, solo en los seres humanos.
11. Zhou *et al*. (2015) han usado recientemente simulaciones «coalescentes» junto con el análisis de todo el genoma de ADN antiguo a fin desarrollar un nuevo método para detectar los barridos selectivos. Junto con los datos 1.000 Genomas Fase I procedentes de África, Europa y las poblaciones de Asia argumentan que pueden superar los conocidos problemas de la interferencia de los cambios demográficos. También afirman ser capaces de discriminar entre positivo, purificador (negativa) y selección equilibradora, así como calcular la fuerza de la selección. Zhou *et al*. recogen las señales de cinco genes relacionados con el cerebro aparentemente bajo selección positiva en el linaje humano antes del éxodo de África. Curiosamente, todos parecen tener algo que ver con la enfermedad de Alzheimer. No recogen ninguna señal de selección positiva para *FOXP2* en la población de África (yoruba-YRI) en los datos de los 1.000 Genomas Fase I, pero sí que detectan una señal de selección positiva para *FOXP2* en los datos poblaciones de la Europa central (recogidos en Utah), unas 1.000 generaciones atrás, o, más o menos, hace 22.000-25.000 años. Estas fechas no llegan a concordar con los estudios previos,

de nuevo apuntando a la dificultad de hacer extrapolaciones hacia el pasado, dada la compleja historia genealógica de la población humana. No está claro aún si, en realidad, este nuevo método propuesto evita las dificultades bien conocidas de los cálculos demográficos, junto con otros temas; con lo difícil que ya es indagar en la enfermedad de Alzheimer hoy, podemos imaginar lo difícil que debe ser saber si un «paciente» que vivió hace 200.000 años tenía esta enfermedad.

12. Lenneberg (1967: 254) despacha rápidamente un argumento debido a Darlington (1947), y ampliado por Brosnahan (1961), según el cual podría haber preferencias vocales de base genética expresadas a través de diferencias estructurales distintas en los tractos vocales humanos, luego canalizadas a través de los principios del menor esfuerzo para dar lugar, finalmente, a distintas poblaciones humanas cuyas capacidades de adquisición del lenguaje se diferenciarían de la población general. Si esto fuera cierto, este efecto se parecería a la capacidad diferencial de los distintos grupos humanos para digerir la lactosa de la leche en la edad adulta (los europeos comparten el gen de la persistencia de lactasa, LCT, mientras que los asiáticos carecen de él). Las pruebas de Brosnahan se basaron en la correlación de una distribución geográfica única de las lenguas que, por lo demás, no estaban históricamente relacionadas (por ejemplo, vascos y ugrofinesas) en su uso de sonidos fonéticos determinados, tales como *th* preferentemente en comparación con la población general. Sin embargo, como señala Lenneberg, la muestra es extremadamente débil, y la genética para esta «preferencia» en realidad nunca ha sido establecida. Una anécdota divertida del biólogo evolutivo Stebbins de sus recuerdos de los Dobzhansky es quizás la mejor y más correcta toma del tema: «Mi intimidad con la familia Dobzhansky me enseñó cosas acerca de la genética y la cultura humanas. En aquella época, C. D. Darlington, citogenetista inglés especialista en plantas, insistía en sus artículos y libros en que la capacidad de pronunciar las palabras de un idioma en particular, en concreto el conjunto *th* en inglés, tiene una base genética. De hecho, él postulaba un vínculo genético entre el fenotipo del grupo sanguíneo A y la capacidad de pronunciar el dígrafo *th* inglés. Cuando le llegaron los ecos en contra de Dobzhansky y otros, él y amigos suyos ingleses difundieron la siguiente conversación apócrifa entre Dobzhansky y Ernst Mayr: "Ernst, you know zat Darlington's idea is silly! Why, anyone can pronounce ze 'th'". Mayr: "Sí, dat's right". Esto, por supuesto, fue correcto con respecto a Doby y Ernst, que aprendieron inglés de mayores. Pero cuando yo estaba en casa de Dobzhansky, oí a su hija Sophie, que entonces era una niña de trece años, hablando con sus padres. Mientras que ambos padres pronuncian la 'th' y otros sonidos del inglés en la forma caricaturizada por Darlington, y que lo habían pronunciado así desde que Sophie era un bebé, la niña hablaba inglés con el típico acento de Nueva York, apenas diferente del mío, que soy neoyorquino de nacimiento» (Stebbins, 1995: 12).

La ausencia de gen/variación en la lengua también parece ser el caso de los pocos intentos recientes que conocemos para vincular la variación genética a los distintos tipos de lenguas, por ejemplo, Dediu y Ladd (2007), que propusieron una posible asociación entre las lenguas tonales, percepción diferencial del tono, con dos secuencias genómicas que, según se había sugerido recientemente, ha-

brían sido seleccionadas positivamente para el tamaño y el desarrollo del cerebro. Este estudio presenta muchas dificultades. Un análisis genético más minucioso de los resultados a partir del Proyecto 1.000 Genomas no ha podido confirmar la selección positiva, y la asociación del lenguaje tonal —por no hablar de conexiones causales— con propiedades genómicas está por verificar, ya que gran parte de la variación genómico-tonal puede explicarse geográficamente. Los trabajos recientes sobre la variación en el gen *FOXP2* (Hoogman *et al*., 2014) también respaldan la opinión de que, aparte de la patología, la variación en este segmento genómico no tiene ningún efecto aparente en la población general.

13. Como indican Ahouse y Berwick (1998), el número original de dedos en los tetrápodos no era cinco en la mano y cinco en los pies, y probablemente los anfibios nunca tuvieron más de cuatro (y generalmente tienen tres) en las patas delanteras y traseras. La genética del desarrollo molecular nos ofrece una explicación inteligente de por qué haya lo sumo cinco tipos diferentes de dedos, incluso si algunos están duplicados.
14. El trabajo de Laura Petitto (1987) sobre la adquisición del lenguaje de signos demuestra lo mismo que Burling de forma bastante espectacular: se utiliza el mismo gesto para señalar y para la referencia pronominal, pero en este último caso, el gesto es anticónico a la edad en que los niños suelen revertir el *yo* y el *tú*.
15. Téngase en cuenta que el argumento todavía se mantiene si suponemos que existe otra posibilidad: que el *FOXP2* construye parte del sistema de entrada-salida para el aprendizaje vocal donde se debe exteriorizar y luego reinternalizar el canto/lengua-canción o habla con uno mismo. Esta seguiría siendo una manera de «canalizar» elementos hacia dentro y hacia fuera del sistema interno, y de serializarlos, posiblemente un componente crucial, en el mismo sentido en que se puede necesitar una manera de imprimir desde fuera del ordenador.
16. Esto es muy parecido a atender únicamente a los diferentes medios por los cuales un televisor LCD y un viejo televisor de tubo de rayos catódicos muestran imágenes que en movimiento sin prestar ninguna atención a la imagen que se está mostrando. El televisor antiguo «pintaba» una imagen mediante un haz de electrones pasando por un conjunto de puntos químicos que brillaban o no. Las pantallas de cristal líquido operan de un modo completamente diferente: más o menos, pasan luz o no a través de una matriz de puntos de cristal líquido en función de una carga eléctrica aplicada a cada «punto», pero no hay ningún haz único. Genera la misma imagen plana por un medio absolutamente diferente. Del mismo modo, si las ranuras lineales temporales se externalizan mediante órdenes motoras o moviendo los dedos hacia el tracto vocal es irrelevante para las representaciones más cruciales «internas»
17. La postulación de un «lenguaje del pensamiento» independiente, para explicar la recursividad de la sintaxis da un paso atrás en la explicación, además de ser innecesaria y bastante oscura. Este es un problema con muchas explicaciones del origen del lenguaje que, de alguna manera, presupone el mismo trabajo compositivo que lleva a cabo el Ensamble.
18. También tenemos que subrayar una vez más que el origen de los conceptos específicos humanos y los «átomos de cálculo» que utiliza el Ensamble sigue siendo

un misterio para nosotros, como lo es para otros escritores contemporáneos como Bickerton (2014). Un intento de indagar en una parte de este problema es la evolución de «iconos» a «símbolos» en el contexto de un modelo de análisis de la evolución por selección natural, véase Brandon y Hornstein, 1986.

Más específicamente, el Ensamble selecciona la cabeza de una construcción cabeza-XP, Pero no selecciona nada en el caso de una construcción XP-YP, es decir, si los dos elementos ensamblados son sintagmas, como SV y SN. Esta última situación prevalece en todos los casos de Ensamble Interno, y lo mismo podría decirse en los ejemplos de sujeto-predicado, construcciones, pequeñas oraciones (por ejemplo, *comió la carne cruda*), y otros. Las reglas convencionales sintagmáticas (independientes del contexto) hacen caer juntos dos procesos: el etiquetado o proyección, y la formación de estructuras jerárquicas. Esto siempre ha implicado varias estipulaciones, por ejemplo, la regla S → SN SV en inglés, que permanece completamente desmotivado. Véase Chomsky, 2012, para un análisis de estas estipulaciones tradicionales junto con un enfoque para eliminar estas estipulaciones mediante la sustitución de un «algoritmo de etiquetado» empíricamente motivado. Véase Chomsky 2015 para problemas adicionales y nuevas mejoras en el enfoque de etiquetado.

19. Howard Lasnik describe la representación de «cortes» a través de una estructura multinivel en el primer capítulo de su *Syntactic Structures Revisited* (2000). Es la representación basada en el sistema empleado en la versión más antigua de la gramática generativa transformacional (Chomsky, 1955), como indica Lasnik. Frank *et al*. no son aparentemente conscientes de la relación con su propia formulación. Lasnik presenta una versión formalizada y mejorada de esta representación en Lasnik y Kupin (1977).
20. Esta restricción jerárquica para determinar la «unión» entre pronombres y los posibles correferentes tiene una larga historia en la gramática generativa moderna. La versión presentada en el texto principal se basa en la versión «clásica» presentada por Chomsky (1981) en *Lectures on Government and Binding*. Hay otras alternativas y formulaciones más recientes que no vamos a tratar aquí; véase, por ejemplo, Reinhart y Reuland (1993).
21. Para ver que la red de transición de estados finitos rechaza *dasdolif* como una palabra válida del navajo porque viola la restricción de las sonoras, comenzamos en el círculo abierto etiquetado 0. A partir de aquí, la consonante d nos lleva hacia atrás en un bucle hasta este estado inicial 0; de manera similar para el siguiente símbolo, *a*. Ahora estamos en el estado 0 y el arco dirigido etiquedado s nos lleva al estado 1. En el estado 1, todos los sonidos sucesivos *d, o, l,* i vuelven haciendo un bucle al estado 1, porque todos son anteriores, consonantes no sonoras o vocales. El símbolo final *f* no tiene transiciones válidas fuera del estado 1, por lo que la máquina anuncia fallo; ha rechazado *dasdolif* como palabra válida del navajo. El lector puede comprobar que la red aceptaría *dasdolis* como palabra válida del navajo.
22. Se podría tratar de imaginar una manera de salir de este problema anotando dos redes lineales diferentes, una en la que juntamos *azul-oscuro* en una especie de palabra compuesta, y otra en la que formamos una nueva «palabra», *cielo-azul*.

Eso sin duda «resuelve» el problema de distinguir los dos significados, pero después del hecho. Tendríamos que hacer esto mismo en todos los casos como este, lo cual no es lo más deseable. Otras variaciones de este tipo de esquema para intentar esquivar la estructura jerárquica van en contra de los efectos prosódicos y de otras influencias de, bueno, estructura jerárquica.

23. En concreto, todas estas teorías pueden ser implementadas como programas de análisis que se ejecutan en lo que se llama tiempo polinómico determinista en la largura de las oraciones de entrada (en algunas máquinas de Turing). Este tipo de computación se llama «P» (por tiempo polinómico determinista) y, por lo general, se distingue de las computaciones que se ejecutan en tiempo polinómico no determinista, la clase NP. Un problema que se puede resolver en el tiempo polinómico determinista en una máquina de Turing en general se considera que es computacionalmente factible, mientras que un problema que solo se puede solucionar en el tiempo polinómico no determinista o peor en general se considera que no es factible. Véase Barton, Berwick y Ristad (1987) para una referencia estándar más antigua que la teoría de la complejidad computacional aplicada al lenguaje natural. Como señala Kobele (2006), la situación actual es que no existe ninguna teoría lingüística que *garantice* una analizabilidad eficiente. Sin embargo, esta distinción no es que signifique mucho desde un punto de vista cognitivo, ya que el factor polinómico asociado suele ser demasiado grande como para que tenga un valor práctico. También existe un gran factor polinómico del tamaño de la gramática que entra en estos resultados. Así que en todos estos marcos el análisis es a la vez demasiado lento y demasiado rápido en comparación con lo que la gente hace. Es demasiado rápido porque estos analizadores pueden analizar oraciones que las personas no pueden analizar, como oraciones engañosas y oraciones insertadas en medio; es demasiado lento porque la gente normalmente puede analizar oraciones en tiempo lineal o mejor. Todo esto significa que ninguna teoría lingüística existente puede explicar por sí misma la velocidad del análisis humano; aparte de la teoría lingüística *per se*, se debe añadir algo más. Téngase en cuenta que algunas teorías, como la LFG o la HPSG son, desde un punto de vista formal, mucho más complejas computacionalmente —por ejemplo, la HPSG basada en la unificación general de gramáticas de atributos—, por lo que *no* existe un límite formal de los tipos de gramáticas que pueden describir. Una vez más, no creemos que esto sea importante desde un punto de vista cognitivo, porque los especialistas suelen imponer restricciones motivadas empíricamente a sus teorías dentro de esos marcos. Finalmente, observamos que las teorías lingüísticas propuestas hace poco como la de la «sintaxis más simple» de Jackendoff (Culicover y Jackendoff, 2005), también parecen apelar a la unificación general, y por tanto son igualmente complejas, mucho más que las teorías más restrictivas de la TAG o los sistemas minimalistas. Estas explicaciones proponen asimismo de forma redundante estas computaciones más poderosas que el Ensamble en varios lugares: no solo en sintaxis, sino también en la interpretación semántica. No nos queda claro por qué se necesita este poder aparentemente duplicado.
24. Carl Pollard (1984) formuló por primera vez una ampliación de las gramáticas libres de contexto con variables, forma similar a esto como la noción de «gramáti-

ca nuclear»; esto es estrictamente más contundente; véase Vijay-Shanker, Weir y Joshi (1987) para una discusión detallada.

25. Steedman 2014 ha razonado explícitamente una transición evolutiva entre sistemas como las gramáticas libres de contexto a esas otras libres de contexto y «un poco más», como las MCFG. Esta sea quizá una fractura natural para la «capacidad generativa débil», pero no vemos cómo se resuelve con el Ensamble. Dado un autómata de pila para las gramáticas libres de contexto, además de un espacio para autómata lineal adicional para variables como en las MCFG, eso produce los «lenguajes ligeramente sensibles al contexto» (véase Vijay-Shanker *et al*. [1987]). Steedman sostiene que se trata de un «retoque» evolutivo incremental de una arquitectura de tipo autómata. No estamos convencidos de ello. No parece que exista tal ruptura natural entre el Ensamble externo y el Ensamble interno, simplemente hay Ensamble, y la pregunta más simple con un elemento interrogativo *wh-*, que todavía está libre de contexto, invoca la versión interna del Ensamble. Steedman también atribuye un gran poder a la evolución por selección natural, y afirma que esta ha «resuelto» el problema de la adquisición fuera de línea: «El aprendizaje tiene que hacerse con los recursos limitados de las máquinas finitas individuales. La evolución tiene recursos prácticamente ilimitados, con números de procesos limitados solo por los recursos físicos del planeta, y un tiempo de procesamiento limitado solo por la existencia continuada de este. Funciona básicamente intentando todas las variaciones posibles sobre todas las variaciones viables hasta ahora» (2014: 3). Esto es incorrecto y pone de manifiesto una mala interpretación de la evolución por selección natural. La selección no es un «ácido algorítmico universal» que sirve como una suerte de piedra filosofal, como dirían algunos autores. El espacio de secuencias genómicas y morfobiológicas es enorme, y la vida solo ha explorado un pequeño rincón de este espacio inmenso de posibilidades. Teóricos de la evolución como Martin Nowak han pensado más seriamente sobre esta cuestión, y han limitado mucho el poder algorítmico de la evolución (Chatterjee *et al*., 2014), demostrando que llevaría demasiado tiempo encontrar «soluciones» a los problemas mediante la selección natural (con frecuencia requiere una cantidad de tiempo computacionalmente intratable, que supera con mucho el tiempo de vida del universo, incluso si se trata de «problemas» biológicos cotidianos como la optimización de la función de un solo gen. (Véase la nota 9 del capítulo 1, que se refiere a cómo Chatterjee y Nowak demuestran que invocar el paralelismo inherente a diferentes organismos y genomas ligeramente diferentes no es suficiente.) Así pues, a la pregunta de si la evolución por selección natural tiene «suficiente mundo y tiempo» para resolver los problemas que Steedman supone que puede resolver, la respuesta es simplemente NO. La selección natural ha hecho muchas cosas maravillosas. Pero no puede hacerlo todo, ni mucho menos. Como nos recuerdan Mayr (1995) y Lane (2015), se las ha arreglado para hacer evolucionar la vida compleja exactamente una vez. Como el lenguaje. Haciéndonos eco de Sean Rice (2004), nos parece que la patina optimista que Steedman da a la selección natural está fuera de lugar, y que es uno de los conceptos erróneos más ampliamente sostenidos acerca de la evolución.

26. Hemos dejado a un lado todas las novedades en un enfoque del tipo de matriz de multiplicación, incluyendo cálculos tensor-matemáticas que más recientemente se han convertido en viables en la comunidad lingüística computacional. Véase, por ejemplo, Humplik, Colina y Nowa (2012).
27. Un ejemplo particularmente claro de esta confusión acerca de la estructura de árbol se puede encontrar en Marcus (2009). Aquí, Marcus argumenta que se equivocaba al decir, como hizo en su libro *The Algebraic Mind* (Marcus, 2001), que: «La mente tiene un modo neural de representar "árboles arbitrarios", como los árboles sintácticos comunes en la lingüística» (2009: 17). Efectivamente estaba equivocado, pero no porque la existencia de árboles lingüísticos implique la necesidad de representar árboles neuralmente. No existe tal necesidad, porque las estructuras de árbol lingüísticas nunca son necesarias para la teoría lingüística. Marcus también trata de argumentar que la memoria de contenido direccionable refleja el tipo adecuado de propiedades que se puede esperar de un sistema neuronal humano biológicamente plausible, y que tales memorias de contenido direccionable tampoco son adecuadas para la representación de la estructura de árbol jerárquico. Esta línea de discusión es así doblemente incorrecta.
28. Recientemente se han hecho trabajos con los monos de Campbell que sugieren que estos animales tienen un proceso de «formación de palabras» parecido al del lenguaje humano, en el que un «afijo» modifica a una «raíz». Es una afirmación controvertida. En cualquier caso, la computación que se necesita es incluso más simple que una red general de transición de estado finito, y no hay representaciones jerárquicas que se ensamblen, de nuevo a diferencia del lenguaje humano, ilustrado en ejemplos conocidos como la palabra *unlockable*, que puede estructurarse, por lo menos, de dos diferentes formas jerárquicas, que dan lugar a dos significados distintos (*unlock*)-*able* o *un*-(*lockable*). El análisis demuestra que el proceso no es asociativo, pero todas las redes de transición de estados finitos, por definición, solo pueden generar lenguajes asociativos.
29. Por desgracia, los investigadores relacionados con el resto de estudios sobre «lenguaje animal» como el de Nim que conocemos (por ejemplo, la investigación sobre el bonobo Kanzi) no han permitido el acceso completo comparable a sus datos, por lo que Yang no ha podido aplicar su método a los datos de estos estudios.
30. Las pruebas recientes de la secuenciación de 225 individuos de Etiopía y Egipto sugieren que se tomó una ruta del norte a través de Egipto, en lugar de una ruta por el sur a través de Etiopía y la península arábiga, con un conjunto de fechas en torno a 60.000 años AP (Pagani *et al*., 2015).
31. Al parecer, la secuenciación del genoma está descubriendo variaciones de la lengua en las poblaciones humanas «normales». Como se ha mencionado en el capítulo 2, el factor de transcripción FOXP2 regula un gen diana hacia abajo, el *CNTNAP2*, que codifica la proteína neurexina. Este gen tiene variantes de polimorfismo de nucleótido único (SNP) en la población humana (Utah-Europa central) en el Proyecto 1.000 Genomas. Kos *et al*. (2012) estudiaron si estas variantes genómicas afectan al procesamiento del lenguaje en personas adultas normales en los demás aspectos, es decir, personas sin déficits de *FOXP2*. Vieron que había algunas diferencias en el procesamiento de características de

concordancia, en función de polimorfismo de un solo nucleótido, por ejemplo, una «letra» del ADN en las variantes *CTNAP2*. Por otro lado, Hoogman *et al*. (2014) no encontraron diferencias fenotípicas en el lenguaje en las variantes de *FOXP2* no patológicas.

BIBLIOGRAFÍA

Abe, Kentaro; Dai Watanabe. 2012. «Songbirds possess the spontaneous ability to discriminate syntactic rules». *Nature Neuroscience* 14: 1067-1074.

Ahouse, Jeremy; Robert C. Berwick. 1998. *Darwin on the mind*. Boston Review of Books, Abril/Mayo.

Aitchison, Jean. 1996. *The Seeds of Speech: Language Origin and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.

—. 1998. «Discontinuing the continuity-discontinuity debate». En: *Approaches to the Evolution of Language: Social and Cognitive Bases*, ed. James R. Hurford, Michael Studdert- Kennedy y Chris Knight, 17-29. Cambridge: Cambridge University Press.

Ariew, André; Richard Lewontin. 2004. «The confusions of fitness». *British Journal for the Philosophy of Science* 55: 347-363.

Baker, Mark C. 2002. *The Atoms of Language*. Oxford: Oxford University Press.

Barton, G. Edward; RobertC. Berwick; Eric S. Ristad. 1987. *Computational Complexity and Natural Language*. Cambridge, MA: MIT Press.

Bar-Yosef, Ofer; Jean-Guillaume Bordes. 2010. «Who were the makers of the Châtelperronian culture?», *Journal ofHuman Evolution* 59 (5): 586-593.

Beckers, Gabriel; Johan Bolhuis; Robert C. Berwick. 2012. «Birdsong neurolinguistics: Context-free grammar claim is premature». *Neuroreport* 23: 139-146.

Bersaglieri, Todd; Pardis C. Sabeti; Nick Patterson; Trisha Vanderploeg; Steve F. Schaffner; Jared A. Drake; Matthew Rhodes; David E. Reich; Joel N. Hirschhorn. 2004. «Genetic signatures of strong recent positive selection at the lactase gene». *American Journal of Human Genetics* 74 (6): 1111-1120.

Berwick, Robert C. 1982. *The Acquisition of Syntactic Knowledge*. Tesis doctoral, Department of Electrical Engineering and Computer Science. Cambridge, MA: The Massachusetts Institute of Technology.

—. 1985. *Locality Principies and the Acquisition of Syntactic Knowledge*. Cambridge, MA: MIT Press.

—. 2011. «All you need is Merge». En: *Biolinguistic Investigations*, ed. Anna Maria Di Sciullo y Cedric Boeckx, 461-491. Oxford: Oxford University Press.

—. 2015. «Mind the gap». En: *50 Years Later: Reflections on Chomsky's Aspects*, ed. Angel J. Gallego and Dennis Ott, 1-12. Cambridge, MA: MIT Working Papers in Linguistics.

—; Samuel David Epstein. 1993. «On the convergence of "minimalist" syntax and categorial grammar». En: *Proceedings of the Third Conference on Algebraic Methodology and Software Technology* (*AMAST* 93), ed. Martin Nivat, Charles Rattray, Teo Rus y George Scollo, 143-148. University of Twente, Enschede the Netherlands: Springer-Verlag.

—; Kazuo Okanoya; Gabriel Beckers; Johan Bolhuis. 2011. «Songs to syntax: The linguistics of birdsong». *Trends in Cognitive Sciences* 15 (3): 113-121.

—; Samuel Pilato. 1987. «Leaming syntax by automata induction». *Machi ne Learning* 2: 9-38.

—; Amy S. Weinberg. 1984. *The Grammatical Basis of Linguistic Performance*. Cambridge, MA: MIT Press.

Bickerton, Derek. 2014. *More Than Nature Needs*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Bloomfield, Leonard. 1926. «A set of postulates for the science of language». *Language* 2 (3): 153-164.

Boeckx, Cedric; Antonio Benítez-Burraco. November 2014. «Globularity and language-readiness: Generating new predictions by expanding the set of genes of interest». *Frontiers in Psychology* 5: 1324. doi:. 10.3389/ fpsyg.20 14.01324.

Bornkessel-Schlesewsky, Ina; Matthias Schlesewsky; Steven L. Small; Josef P. Auschecker. 2015. «Neurobiological roots of language in primate audition: common computational properties». *Trends in Cognitive Sciences* 19 (3): 142-150.

Boyd, Lomax J.; Stephanie L. Skove; Jeremy P. Rouanet; Louis-Jan Pilaz; Tristan Bepler; Raluca Gordân; Gregory A. Wray; Debra L. Silver. 2015. «Human-Chimpanzee differences in a FZD8 enhancer alter cell-cycle dynamics in the developing neocortex». *Current Biology* 25: 772-779.

Brandon, Robert; Norbert Homstein. 1986. «From icons to symbols: Some speculations on the origin of language». *Biology & Philosophy* 1: 169-189.

Briscoe, Josie; Rebecca Chilvers: Torsten Baldeweg; David Skuse. 2012. «A specific cognitive deficit within semantic cognition across a multi-generational family». *Proceedings of the Royal Society Series B, Biological Sciences* 279(1743): 3652-3661.

Brosnahan, L. Francis. 1961. *The Sounds of Language: An Inquiry into the Role of Genetic Factors in the Development of Sound Systems*. Cambridge: Heffer.

Burling, Robbins. 1993. Primate calls, human language, and nonverbal communication. *Current Anthropology* 34 (1): 25-53.

Carroll, Sean. 2005. *Endless Forms Most Beautiful*. Nueva York: Norton.

Chatterjee, Krishendu; Andreas Pavlogiannis; Ben Adlam; Martin A. Nowak. 2014. The time scale of evolutionary innovation. *PLoS Computational Biology* 10 (9): e1003818.

Chomsky, Carol, 1986. «Analytic study of the Tadoma method: Language abilities of three deaf-blind subjects», *Journal of Speech and Hearing Research* 29 (3): 332-347.

Chomsky, Noam. 1955. *The Logical Structure of Linguistic Theory*. Ms. Harvard University, Cambridge, MA.

—. 1956. «Three models for the description of language». *I.R.E. Transactions on Information Theory* IT-2: 113-124.

—. 1957. *Syntactic Structures*. La Haya: Mouton. [Versión en castellano: *Estructuras sintácticas*. Ciudad de México: Siglo XXI Editores, 1974.]

—. 1965. *Aspects of the Theory of Syntax*. Cambridge, MA: MIT Press. [Versión en castellano: *Aspectos de la teoría de la sintaxis*. Barcelona: Editorial Gedisa, 1999.]

—. 1976. «On the nature of Ianguage», En: *Origins and Evolution of Language and Speech*, ed. Stevan Harnad, Horst D. Steklis and Jane Lancaster, 46-57. Nueva York: New York Academy of Sciences.

—. 1980. *Rules and Representations*. Nueva York: Columbia University Press. [Versión en castellano: *Reglas y representaciones*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 1983.]

—. 1981. *Lectures on Government and Binding*. Dordrecht: Foris.

—. 2010. «Sorne simple evo-devo theses: How might they be true for language?», En: *The Evolution of Human Language*, ed. Richard K. Larson, Viviene Déprez y Hiroko Yamakido, 45-62. Cambridge: Cambridge University Press.

—. 2012. «Problems of projection». *Lingua* 130: 33-49.

—. 2015. «Problems of projection extensions». En: *Structures, Strategies and Beyond: Studies in Honour of Adriana Belletti*, ed. Elisa Di Domenico, Comelia Hamann y Simona Matteini, 1-16. Ámsterdam: John Benjamins.

Coen, Michael. 2006. *Multi-Modal Dynamics: Self-Supervised Learning in Perceptual and Motor Systems*. Tesis doctoral, Department of Electrical Engineering and Computer Science. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.

Cohen, Shay B.; Giorgio Satta; Michael Collins. 2013. «Approximate PCFG parsing using tensor decomposition». En: *Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, 487-496. Atlanta, Georgia: Association for Computational Linguistics.

Colosimo, Pamela F.; Sarita Balabhadra; Guadalupe Villarreal Jr.; Mark Dickson; Jane Grimwood; Jeremy Schmutz; Richard M. Myers; Dolph Schluter; David M. Kingsley. 2005. «Widespread parallel evolution in sticklebacks by repeated fixation of *Ectodysplasin* alleles». *Science* 307: 1928-1933.

—; Catherine L. Peichel; Kirsten Nereng; Benjamin K. Blackman; Michael D. Shapiro; Dolp Schluter y David M. Kingsley. 2004. «The genetic architecture of parallel armor plate reduction in threespine sticklebacks». *PLoS Biology* 2: 635-641.

Comins, Jordan A.; Tiomthy Q. Gentner. 2015. «Pattem-Induced covert category leaming in songbirds». *Current Biology* 25: 1873-1877.

Crain, Stephen. 2012. *The Emergence of Meaning.* Cambridge: Cambridge University Press.

Cudworth, Ralph. 1731. *A Treatise Concerning Eternal and Immutable Morality.* Londres: James and John Knapton.

Culicover, Peter; Ray Jackendoff. 2005. *Simpler Syntax*. Oxford: Oxford University Press.

Curtiss, Susano 2012. «Revisiting modularity: Using language as a window to the mind». En: *Rich Languages from Poor Inputs*, ed. Massimo Piatelli-Palmarini and Robert C. Berwick, 68-90. Oxford: Oxford University Press.

Darlington, Charles D. 1947. «The genetic component of language». *Heredity* 1: 269-286.

Darwin, Charles. [1856] 1990. *Darwin Correspondence Project*. Vol. 6. Cambridge: Cambridge University Press.

—. 1859. *On the Origin of Species*. Londres: John Murray. [Versión en castellano: *El origen de las especies por medio de la selección natural*. Madrid: Los Libros de la Catarata/CSIC, 2009.]

—. 1868. *Variation of Plants and Animals under Domestication*. Londres: John Murray. [Versión en castellano: *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación*. Madrid: Los Libros de la Catarata/CSIC, 2 vols., 2008.]

—. 1871. *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*. Londres: John Murray. [Versión en castellano: El origen del hombre. Barcelona: Editorial Crítica, 2009.]

—. 1887. *The Autobiography of Charles Darwin*. Londres: John Murray. [Versión en castellano: *Autobiografía*. Madrid: Alianza Editorial, 1993.]

Dediu, Daniel; D. Robert Ladd. 2007. «Linguistic tone is related to the population frequency of the adaptive haplogroups of two brain size genes». ASPM and Microcephalin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (26): 10944-10949.

Dejerine, Joseph Jules. 1895. *Anatomie des Centres Nerveux*. París: Rueff et Cie.

Ding, Nai; Yue Zhang; Hong Tian; Lucia Melloni; David Poeppel. 2014. «Cortical dynamics underlying online building of hierarchical structures». *Proceedings of the Society for Neuroscience* 2014. Poster 204.14. Washington, DC: Society for Neuroscience.

—; Yue Zhang; Hong Tian; Lucia Melloni; David Poeppel. 2015, en prensa. Cortical dynamics underlying online building of hierarchical structures. *Nature Neuroscience*.

Dobzhansky, Theodosius. 1937. *Genetics and the Origin of Species*. Nueva York: Columbia University Press. [Versión en castellano: *Genética y el origen de las especies*. Madrid: Revista de Occidente, 1955.]

Earley, Jay. 1970. An efficient context-free parsing algorithm. *Communications of the ACM* 13 (2): 94-102.

Enard, Wolfgang; Molly Przeworski; Simon E. Fisher; Cecillia Lai; Victor Wiebe; Takashi Kitano; Anthony P. Monaco; Svante Paääbo, 2005. «Molecular evolution of FOXP2, a gene involved in speech and language», *Nature* 418: 869-872.

Engesser, Sabrina; Jodie M. S. Crane; James L. Savage; Andrew F. Russell; Simon W. Townsend. 2015. «Experimental evidence for phonemic contrasts in a nonhuman vocal system», *PLoS Biology*. doi:.l0.1371/journal.pbio.l002171.

Feynman, Richard. 1959/1992. «There's plenty of room at the bottom». *Journal of Microelectromechanical Systems* 1 (1): 60-66.

Fisher, Ronald A. 1930. *The Genetical Theory of Natural Selection*. Londres: Clarendon.

Fisher, Simon E.; Faraneh Vargha-Khadem; Katherine E. Watkins; Anthony P. Monaco; Marcus E. Pembrey. 1998. «Localisation of a gene implicated in asevere speech and language disorder». *Nature Genetics* 18 (2): 168-170.

Fitch, William Tecumseh. 2010. *The Evolution of Language*. Cambridge: Cambridge University Press.

—; Michael A. Arbib; Merlin Donald. 2010. «A molecular genetic framework for testing hypotheses about language evolution». En: *Proceedings of the 8th International Conference on the Evolution of Language*, ed. Andrew D. M. Smith, Marieke Schouwstra, Bart de Boer y Kenny Smith, 137-144. Singapur: World Scientific.

Fong, Sandiway. 1991. *Computational Implementation of Principle- Based Parsers.* Tesis doctoral, Department of Electrical Engineering and Computer Science. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.

Frey, Stephen; Scott Mackey; Michael Petrides. 2014. «Corticocortical connections of areas 44 and 45B in the macaque monkey». *Brain and Language* 131: 36-55.

Friederici, Angela. 2009. «Language and the brain». En: *Of Minds and Language, A Dialogue with Noam Chomsky in the Basque Country*, ed. Massimo Piattelli-Palmarini, Juan Uriagereka y Pello Salaburu , 352-377. Oxford: Oxford University Press.

Gallistel, Charles G. 1990. «Representations in animal cognition: An introduction». *Cognition* 37 (1-2): 1-22.

—; Adam Philip King. 2009. *Memory and the Computational Brain*. Nueva York: Wiley.

Gehring, Walter. 2005. «New perspectives on eye development and the evolution of eyes and photoreceptors». *Journal of Heredity* 96 (3): 171-184.

—. 2011. «Chance and necessity in eye evolution». *Genome Biology and Evolution* 3: 1053-1066.

Gillespie, John. 2004. *Population Genetics: A Concise Guide*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Goldschmidt, Richard. 1940. *The Material Basis of Evolution*. New Haven, CT: Yale University Press.

Goodall, Jane. 1986. *The Chimpanzees of Gombe: Patterns of Behavior.* Boston: Belknap Press of the Harvard University Press.

Gould, Stephen J.; Steven Rose. 2007. *The Richness of Life: The Essential Stephen Jay Gould*. Nueva York: W.W. Norton and Company.

Graf, Thomas. 2013. *Local and transderivational Constraints on Syntax and Semantics.* Tesis doctoral, Department of Linguistics. Los Ángeles: University of California at Los Angeles.

Graham, Susan L.; Michael A. Harrison; Walter Ruzzo. 1980. «An improved context-free recognizer». *ACM Transactions on Programming Languages and Systems* 2 (3): 415-462.

Grant, Peter; Rosemary Grant. 2014. *Forty Years of Evolution: Darwin's Finches on Daphne Major Island*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Groszer, Matthias; David A. Keays; Robert M. J. Deacon; Joseph P. de Bono; Shetwa Prasad-Mulcare; Simone Gaub; Muriel G. Baum; Catherine A. French; Jérôme Nicod; Julie A. Coventry; Wolfgang Enard; Martin Fray; Steve D. M. Brown; Patrick M. Nolan; Svante Pääbo; Keith M. Channon; Rui M. Costa; Jens Eilers; Günter Ehret; J. Nicholas P. Rawlins; Simon E. Fisher. 2008. «Impaired synaptic plasticity and motor learning in mice with a point mutation implicated in human speech deficits». *Current Biology* 18: 354-362.

Gunz, Philipp; Simon Neubauer; Bruno Maureille; Jean-Jacques Hublin. 2010. «Brain development after birth differs between Neanderthals and modern humans», *Current Biology* 20 (21): R921-R922.

Haldane, John Burdon Sanderson. 1927. «A mathematical theory of natural and artificial selection, Part V: Selection and mutation». *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 23 (7): 838-844.

Hansson, Gunnar Ólafur. 2001. «Remains of a submerged continent: Preaspiration in the languages of Northwest Europe». En: *Historical Linguistics 1999: Selected Papers from the 14th International Conference on Historical Linguistics*, ed. Laurel J. Brinton, 157-173. Ámsterdam: John Benjamins.

Hardy, Karen; Jennie Brand-Miller; Katherine D. Brown; Mark G. Thomas; Les Copeland. 2015. «The Importance of dietary carbohydrate in human evolution». *The Quarterly Review of Biology* 90 (3): 251-268.

Harmand, Sonia; Jason E. Lewis; Craig S. Feibel; Christopher 1. Lepre; Sandrine Prat; Arnaud Lenoble; Xavier Boës; Horst D. Steklis; Jane Lancaster. 2015. «3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya», *Nature* 521: 310-315.

Harnad, Stevan; Horst D. Steklis; Jane Lancaster, eds. 1976. *Origins and Evolution of Language and Speech*. Nueva York: New York Academy of Sciences.

Harris, Zellig. 1951. *Methods in Structural Linguistics*. Chicago: University of Chicago Press.

Hauser, Marc. 1997. *The Evolution of Communication*. Cambridge, MA: MIT Press.

Heinz, Jeffrey. 2010. «Learning long-distance phonotactics». *Linguistic Inquiry* 41: 623-661.

—; William Idsardi. 2013. «What complexity differences reveal about domains in language». *Topics in Cognitive Science* 5 (1): 111-131.

Henshilwood, Christopher; Francesco d'Errico; Royden Yates; Zenobia Jacobs; Chantal Tribolo; GeoffA. T. Duller; Norbert Mercier. 2002. «Emergence of modern human behavior: Middle Stone Age engravings from South Africa». *Science* 295: 1278-1280.

Hermer-Vazquez, Linda; Alla S. Katsnelson; Elizabeth S. Spelke. 1999. «Sources of flexibility in human cognition: Dual-task studies of space and language», *Cognitive Psychology* 39 (1): 3-36.

Hennessy, John L.; David A. Patterson. 2011. *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. Waltham, MA: Morgan Kaufman Publishers.

Hingham, Thomas; Fiona Brock; Christopher Bronk Ramsey; William Davies; Rachel Wood; Laura Basell. 2011. «Chronology of the site of Grotte du Renne, Arcy-sur-Cure, France: Implications for Neandertal symbolic behavior», *Before Farm* 2: 1-9.

Hinzen, Wolfram. 2006. *Mind Design and Minimal Syntax*. Oxford: Oxford University Press.

Hittinger, Chris Todd; Sean B. Carroll. 2007. «Gene duplication and the adaptive evolution of a classic genetic switch». *Nature* 449 (7163): 677-681.

Hoogman, Martine; Julio Guadalupe; Marcel P. Zwiers; Patricia Klarenbeek; Clyde Francks; Simon E. Fisher. 2014. «Assessing the effects of common variation in the FOXP2 gene on human brain structure», *Frontiers in Human Neuroscience* 8: 1-9.

Hornstein, Norbert. 2009. *A Theory of Syntax*. Cambridge: Cambridge University Press.

Huerta-Sánchez, Xin Jin; Asan; Zhuoma Bianba; Benjamin M. Peter; Nicolas Vinckenbosch; Yu Liang; Xin Yi; Mingze He; Mehmet Somel; Peixiang Ni; Bo Wang; Xiaohua Ou; Huasang; Jiangbai Luosang; Zha Xi Ping Cuo; Kui Li; Guoyi Gao; Ye Yin; Wei Wang; Xiuqing Zhang; Xun Xu; Huanming Yang; Yingrui Li; Jian Wang; Jun Wang; Rasmus Nielsen. 2014. «Altitude adaptation in Tibetans caused by introgression of Denisovan-like DNA». *Nature* 512: 194-197.

Humplik, Jan; Alison L. Hill; Martin A. Nowak. 2014. «Evolutionary dynamies of infectious diseases in finite populations». *Journal of Theoretical Biology* 360: 149-162.

Hurford, James. 1990. «Beyond the roadblock in linguistic evolution studies». *Behavioral and Brain Sciences* 13 (4): 736-737.

—; MichaeI Studdert-Kennedy; Chris Knight. 1998. *Approaches to the Evolution of Language: Cognitive and Linguistic Bases.* Cambridge: Cambridge University Press.

Huxley, Julian. 1963. *Evolution: The Modern Synthesis.* 3.ª ed. Londres: Allen and Unwin. [Versión en castellano: *La evolución: síntesis moderna*. Buenos Aires: Editorial Losada, 1946.]

Huxley, Thomas. 1859. *Letter to Charles Darwin, November 23. Darwin Correspondence Project, letter 2544*. Cambridge: Cambridge University Library; www.darwinproject.ac.uk/letter/entry-2544.

Jacob, François. 1977. «Darwinism reconsidered». Le Monde, septiembre, 6-8.

—. 1980. *The Statue Within*. Nueva York: Basic Books. [Versión en castellano: *La estatua interior.* Barcelona: Tusquets Editores, 1989.]

—. 1982. *The Possible and the Actual*. Nueva York: Pantheon. [Versión en castellano: *El juego de lo posible: ensayo sobre la diversidad de los seres vivos*. Barcelona: Editorial Grijalbo, 1982.]

Jerrison, Harry. 1973. *Evolution of the Brain and Intelligence*. Nueva York: Academic Press.

Jobling, Mark A.; Edward Hollox; Matthew Hurles; Toomas Kivsild; Chris Tyler-Smith. 2014. *Human Evolutionary Genetics*. Nueva York: Garland Science, Taylor and Francis Group.

Joos, Martin. 1957. *Readings in Linguistics*. Washington, DC: American Council of Learned Societies.

Jürgens, Uwe. 2002. «Neural pathways underlying vocal control». *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 26 (2): 235-258.

Kallmeyer, Laura. 2010. *Parsing Beyond Context-Free Grammars*. Nueva York: Springer.

Kimura, Moota. 1983. *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.

King, Marie-Claire; Alan Wilson. 1975. «Evolution at two levels in humans and chimpanzees». *Science* 188 (4184): 107-116.

Kleene, Stephen. 1956. *Representation of Events in Nerve Nets and Finite Automata*. Annals of Mathematical Studies 34. Princeton: Princeton University.

Kobele, Gregory. 2006. *Generating Copies: An Investigation into Structural Identity in Language and Grammar.* Tesis doctoral, Department of Linguistics. Los Ángeles: University of California at Los Angeles.

Kos, Miriam; Danielle van den Brink; Tineke M. Snijders; Mark Rijpkema; Barbara Franke; Guillen Fernandez; Peter Hagoort. 2012. «CNTNAP2 and language processing in healthy individuals as measured with ERPs». *PLoS One 7* (10): e4699S, Oct. 24. doi: PMCID: PMC3480372. 10.1371/journal.pone.004699S.

Koulouris, Andreas; Nectarios Koziris; Theodore Andronikos; George Papakonstantinou; Panayotis Tsanakas. 1998. «A parallel parsing VLSI architecture for arbitrary context-free grammars». *Proceedings of the 1998 Conference on Parallel and Distributed Systems*, IEEE, 783-790.

Krause, Johannes; CarIes Lalueza-Fox; Ludovic Orlando; WoIfgang Enard; Richard Green; Herman A. Burbano; Jean-Jacques Hublin. 2007. «The derived FOXP2 variant of modern humans was shared with Neandertals». *Current Biology* 17: 1-5.

Kuypers, Hanricus Gerardus Jacobus Maria. 1958. «Corticobulbar connections to the pons and lower brainstem in man: An anatomical study». *Brain* 81 (3): 364-388.

Lane, Nicholas. 2015. *The Vital Question: Why Is Lije the Way It Is?* Londres: Profile Books Ltd.

Lashley, Karl. 1951. «The problem of serial order in behavior». En: *Cerebral Mechanisms in Behavior*, ed. Lloyd A. Jeffress, 112-136. Nueva York: Wiley.

Lasnik, Howard. 2000. *Syntactic Structures Revisited*. Cambrige, MA: MIT Press.

—; Joseph Kupin. 1977. «A restrictive theory of transformational grammar». *Theoretical Linguistics* 4: 173-196.

Lenneberg, Eric H. 1967. *Biological Foundations of Language*. Nueva York: Wiley. [Versión en castellano: *Fundamentos biológicos del lenguaje*. Madrid: Alianza Editorial, 1985.]

Lewontin, Richard. 1998. «The evolution of cognition: Questions we will never answer», En: *Methods, Models, and Conceptual Issues: An Invitation to Cognitive Science*, ed. Don Scarborough and Mark Liberman, 108-132. 4.ª ed. Cambridge, MA: MIT Press.

—. 2001. *The Triple Helix*. Nueva York: New York Review of Books Press. [Versión en castellano: *Genes, organismo y ambiente: las relaciones de causa y efecto en biología*. Barcelona: Editorial Gedisa, 2000.]

Lindblad-Toh, Kersten; Manuel Garber; Or Zuk; Michael F. Lin; Brian J. Parker; Stefan Washietl; Pouya Kheradpour; Jason Emst; Gregory Jordan; Evan Mauceli; Lucas D. Ward; Craig B. Lowe; Alisha K. Holloway; Michele Clamp; Sante Gnerre; Jessica Alföldi; Kathryn Beal; Jean Chang; Hiram Clawson; James Cuff; Federica Di Palma; Stephen Fitzgerald; Paul Flicek; Mitchell Guttman; Melissa J. Hubisz; David B. Jaffe; Irwin Jungreis; W. James Kent: Dennis Kostka; Marcia Lara; Andre L. Martins; Tim Massingham; Ida Moltke; Brian J. Raney; Matthew D. Rasmussen; Jim Robinson; Alexander Stark; Albert J. Vilella; Jiayu Wen; Xiaohui Xie; Michael C. Zody; Broad Institute Sequencing Platform and Whole Genome Assembly Team; Kim C. Worley; Christie L. Kovar; Donna M. Muzny; Richard A. Gibbs; Baylor College of Medicine Human Genome Sequencing Center Sequencing Team; Wesley C. Warren; Elaine R. Mardis; George M. Weinstock; Richard K. Wilson; Genome Institute at Washington University; Ewan Bimey; Elliott H. Margulies; Javier Herrero; Eric D. Green; David Haussler; Adam Siepel; Nick Goldman; Katherine S. Pollard; Jakob S. Pedersen; Eric S. Lander; Manolis Kellis. 2011. «A high-resolution map of human evolutionary constraint using 29 mammals». *Nature* 478: 476-482.

Luria, Salvador. 1974. *A Debate on Bio-Linguistics*. Endicott House, Dedham, MA, Mayo 20-21. París: Centre Royaumont pour une science de l'homme.

Lyell, Charles. 1830-1833. *Principles of Geology*. Londres: John Murray.

Lynch, Michael. 2007. *The Origins of Genome Architecture*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.

Mampe, Birgit; Angela D. Friederici; Anne Christophe; Kristine Wermke. 2009. «Newboms' cry melody is shaped by their native language», *Current Biology* 19 (23): 1994-1997.

Marchant, James. 1916. *Alfred Russel Wallace Letters and Reminiscences*. Londres: Cassell.

Marcus, Gary. 2001. *The Algebraic Mind*. Cambridge, MA: MIT Press.

—. 2009. «How does the mind work?», *Topics in Cognitive Science* 1 (1): 145-172.

Margulis, Lynn. 1970. *Origin of Eukaryotic Cells*. New Haven: Yale University Press.

Maricic, Tomislav; Viola Günther; Oleg Georgiev; Sabine Gehre; Marija Curlin; Christiane Schreiweis; Ronald Naumann; Hernán A. Burbano; Matthias Meyer; Carles Lalueza-Fox; Marco de la Rasilla; Antonio Rosas; Sre ć ko Gajovi ć; Janet Kelso; Wolfgang Enard; Walter Schaffner; Svante Pääbo. 2013. «A recent evolutionary change affects a regulatory element in the human *FOXP2* gene». *Molecular Biology and Evolution* 30 (4): 844-852.

Maynard Smith, John. 1982. *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge: Cambridge University Press.

—; Eörs Szathmáry. 1995. *The Major Transitions in Evolution*.

—. Richard Burian; Stuart Kauffman; Pere Alberch; John Campbell; Brian Goodwin; Russell Lande; David Raup; Lewis Wolpert. 1985. «Developmental constraints and evolution: A perspective from the Mountain Lake Conference on development and evolution». *Quarterly Review of Biology* 60 (3): 265-287.

Mayr, Emst. 1963. *Animal Species and Evolution*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press. [Versión en castellano: *Especies animales y evolución*. Barcelona: Editorial Ariel, 1968.]

—. 1995. «Can SETI Succeed? Not Likely», *Bioastronomy News* 7 (3). http://www.astro.umass.edu/~mhanner/Lecture_Notes/Sagan-Mayr.pdf.

McMahon, April; Robert McMahon. 2012. *Evolutionary Linguistics* . Cambridge: Cambridge University Press.

McNamara, John M. 2013. «Towards a richer evolutionary game theory», [doi: 10.1098/rsif.2013.0544]. *Journal of the Royal Society, Interface* 10 (88): 20130544.

Mellars, Paul. 2010. «Neanderthal symbolism and ornament manufacture: The bursting of a bubble?» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (47): 20147-20148.

Minksy, Marvin L. 1967. *Computation: Finite and Infinite Machines*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Monod, Jacques. 1970. *Le hasard et la nécessité*, París: Seuil. [Versión en castellano: *El azar y la necesidad*. Barcelona: Tusquets Editores, 1977.]

—. 1972. *Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology*. Nueva York: Vintage Books.

Müller, Gerd. 2007. «Evo-devo: Extending the evolutionary synthesis», *Nature Reviews. Genetics* 8: 943-949.

Muller, Hermann 1. 1940. «Bearing of the *Drosophila* work on systematics». En: *The New Systematics*, ed. Julian S. Huxley, 185-268. Oxford: Clarendon Press.

Musso, Mariacristina; Andrea Moro; Volkmar Glauche; Michel Rijntjes; Jürgen Reichenbach; Christian Büchel; Cornelius Weiller. 2003. «Broca's area and the language instinct». *Natstedstedure neuroscience* 6: 774-781.

Newmeyer, Frederick J. 1998. «On the supposed "counter-functionality" of Universal Grammar: Some evolutionary implications». En: *Approaches to the Evolution of Language*, ed. James R. Hurford, Michael Studdert Kennedy y Christopher Knight 305-319. Cambridge: Cambridge University Press.

Nilsson, D. E.; Susanne Pelger. 1994. «A pessimistic estimate of the length of time required for an eye to evolve». *Proceedings ofthe Royal Society Series B* 256 (1345): 53-58.

Niyogi, Partha; Robert C. Berwick. 2009. «The proper treatment of language acquisition and change», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109: 10124-10129.

Nowak, Martin A. 2006. *Evolutionary Dynamics*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Ohno, Susumu. 1970. *Evolution by Gene Duplication*. Berlín: Springer-Verlag.

Okanoya, Kazuo. 2004. «The Bengalese finch: A window on the behavioral neurobiology of birdsong syntax». *Annals of the New York Academy of Sciences* 1016: 724-735.

Orr, H. Allen. 1998. «The population genetics of adaptation: the distribution of factors fixed during adaptive evolution». *Evolution; International Journal of Organic Evolution* 52 (4): 935-949.

—. 2005a. «The genetic theory of adaptation». *Nature Reviews. Genetics* 6: 119-127.

—. 2005b. «A revolution in the field of evolution?» *New Yorker (New York, N.Y.)* (octubre): 24.

—; Jerry A. Coyne. 1992. «The genetics of adaptation revisited», *American Naturalist* 140: 725-742.

Ouattara, Karim; Alban Lemasson; Klaus Zuberbühler. 2009. «Campbell's monkeys concatenate vocalizations into context-specific call sequences». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (51): 22026-22031.

Pääbo, Svante. 2014a. «The human condition–a molecular approach», *Cell* 157 (1): 216-226.

—. 2014b. «Neanderthal Man», En: *Search of Lost Genomes*. Nueva York: Basic Books.

Pagani, Luca; Stephan Schiffels; Deepti Gurdasani; Petr Danecek; Aylwyn Scally; Yuan Chen; Yali Xue. 2015. «Tracing the route of modern humans out of Africa using 225 human genome sequences from Ethiopians and Egyptians». *American Journal of Human Genetics* 96: 1-6.

Perani, Daniela; Maria C. Saccumana; Paola Scifo; Alfred Anwander; Danilo Spada; Cristina Baldolib; Antonella Poloniato; Gabriele Lohmann; Angela D. Friederici. 2011. «Neural language networks at birth», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (38): 16056-16061.

Petitto, Laura Anne. 1987. «On the autonomy of language and gesture: Evidence from the acquisition of personal pronouns in American Sign Language». *Cognition* 27 (1): 1-52.

—. 2005. «How the brain begets language», En: *The Chomsky Reader*, ed. James McGilvray, 85-101. Cambridge: Cambridge University Press.

Pfenning, Andreas R.; Erina Hara; Osceola Whitney; Miriam V. Rivas; Rui Wang; Petra L. Roulhac; Jason T. Howard M. Arthur Moseley; J. Will Thompson; Erik J. Soderblom; Atsushi Iriki; Masaki Kato; M. Thomas P. Gilbert; Guojie Zhang; Trygve Bakken; Angie Bongaarts; Amy Bemard; Ed Lein; Claudio V. Mello; Alexander J. Hartemink; Erich D. Jarvis. 2014. «Convergent transcriptional specializations in the brains of humans and song-learning birds», *Science* 346 (6215): 1256846: 1-10.

Pinhasi, Ronald; Thomas F. G. Higham; Liubov V. Golovanova; Vladimir B. Doronichevc. 2011. «Revised age of late Neanderthal occupation and the end of the Middle Paleolithic in the northern Caucasus», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (21): 8611- 8616.

Pinker, Steven; Paul Bloom. 1990. «Natural language and natural selection». *Behavioral and Brain Sciences* 13 (4): 707-784.

—; Heather K. J. van der Lely. 2014. «The biological basis of language: insight from developmental grammatical impairments». *Trends in Cognitive Sciences* 18 (11): 586-595.

Poelwijk, Frank; Daniel J. Kiviet; Daniel M. Weinreich; Sander J. Tans. 2007. «Empirical fitness landscapes reveal accessible evolutionary paths», *Nature* 445 (25): 383-386.

Pollard, Carl. 1984. *Generalized Phrase Structure Grammars, Head Grammars and Natural Language*. Tesis doctoral, Stanford, CA: Stanford University.

Prabhakar, Shyam; James P. Noonan; Svante Pbo; Edward M. Rubin. 2006. «Accelerated evolution of conserved noncoding sequences in humans». *Science* 314: 786.

Priestley, Joseph. 1775. *Hartley's Theory of the Human Mind*. Londres: J. Johnson.

Ptak, Susan E.; Wolfgang Enard; Victor Wiebe; loes Hellmann; Johannes Krause; Michael Lachmann; Svante Pääbo, 2009. «Linkage disequilibrium extends across putative selected sites in *FOXP2*». *Molecular Biology and Evolution* 26: 2181-2184.

Pulvermüller, Friedemann. 2002. *The Neuroscience of Language*. Cambridge: Cambridge University Press.

Ramus, Franck; Simon E. Fisher. 2009. «Genetics of language». En: *The Cognitive Neurosciences*. 4.ª ed., ed. Michael S. Gazzaniga, 855-871. Cambridge, MA: MIT Press.

Reinhart, Tanya; Eric Reuland. 1993. «Reflexivity», *Linguistic Inquiry* 24: 657-720.

Rice, Sean R. 2004. *Evolutionary Theory: Mathematical and Conceptual Foundations*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.

—. Anthony Papadapoulos; John Harting. 2011. «Stochastic processes driving directional selection». En: *Evolutionary Biology–Concepts, Biodiversity, Macroevolution and Genome Evolution* , ed. Pierre Pontarotti, 21-33. Berlín: Springer-Verlag.

Rosenfeld, Azriel, 1982. «Quadtree grammars for picture languages», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-12 (3): 401-405.

Samet, Hanan; Azriel Rosenfeld. 1980. «Quadtree representations of binary images», *Proceedings of the 5th International Conference on Pattern Recognition*, 815-818.

Sapir, Edward; Harry Hoijer. 1967. *The Phonology and Morphology of the Navaho Language*. Los Ángeles: University of California Publications in Linguistics.

Sauerland, Uli; Hans Martin Gärtner, 2007. *Interfaces + Recursion = Language*? Nueva York: Mouton.

Saussure, Ferdinand. 1916. *Cours de linguistic générale*. París: Payot. [Versión en castellano: *Curso de lingüística general*. Madrid: Alianza Editorial, 1987.]

Schreiweis, Christiane; Ulrich Bornschein; Eric Burguière; Cemil Kerimoglu; Sven Schreiter; Michael Dannemann; Shubhi Goyal. 2014. «Humanized *Foxp2* accelerates learning by enhancing transitions from declarative to procedural performance». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (39): 14253-14258.

Schuler, William; Samir Abdel Rahman; Tim Miller; Lane Schwartz. 2010. «Broad-coverage parsing using human-like memory constraints». *Computational Linguistics* 36 (1): 1-30.

Sherman, Michael. 2007. «Universal genome in the origin of Metazoa: Thoughts about evolution». *Cell Cycle (Georgetown, TX)* 6 (15): 1873-1877.

Smith, Neil; Ianthi-Maria Tsimpli. 1995. *The Mind of a Savant: Language, Learning, and Modularity*. Nueva York: Wiley.

Somel, Mehmet; Xiling Liu; Philip Khaitovich. 2013. «Human brain evolution: Transcripts, metabolites and their regulators». *Nature Reviews Neuroscience* 114: 112-127.

Spoor, Frederick; Philip Gunz; Simon Neubauer; Stefanie Stelzer; Nadia Scott; Amandus Kwekason; M. Christopher Dean. 2015. «Reconstructed *Homo habilis* type OH 7 suggests deep-rooted species diversity in early *Homo*», *Nature* 519 (7541): 83-86.

Stabler, Edward. 1991. «Avoid the pedestrian's paradox». En: *Principlebased Parsing*, ed. Robert C. Berwick, Stephen P. Abney y Carol Tenny, 199-237. Dordrecht: Kluwer.

—. 2011. «Top-down recognizers for MCFGs and MGs». En: *Proceedings of the 2* nd *Workshop on Cognitive Modeling and Computational Linguistics*, ed. Frank Keller and David Reiter, 39-48. Stroudsburg, PA: Association for Computational Linguistics.

—. 2012. «Top-down recognizers for MCFGs and MGs». *Topics in Cognitive Science* 5: 611-633.

Stebbins, Ledyard. 1995. «Recollections of a coauthor and close friend». En: *Genetics of Natural Populations, the continuing influence of Theodosius Dobzhansky*, ed. Louis Levine, 7-13. Nueva York: Columbia University Press.

Steedman, Mark. 2014. «Evolutionary basis for human language». *Physics of Life Reviews* 11 (3): 382-388.

Steffanson, Hreinn; Agnar Helgason; Gudmar Thorleifsson; Valgerdur Steinthorsdottir; Gisli Masson; John Bamard; Adam Baker; Aslaug Jo-

nasdottir; Andres Ingason; Vala G. Gudnadottir; Natasa Desnica; Andrew Hicks; Arnaldur Gylfason; Daniel F. Gudbjartsson; Gudrun M. Jonsdottir; Jesus Sainz; Kari Agnarsson; Birgitta Birgisdottir; Shyamali Ghosh; Adalheidur; Olafsdottir; Jean-Baptiste Cazier; Kristleifur Kristjansson; Michael L Frigge; Thorgeir E. Thorgeirsson; Jeffrey R. Gulcher; Augustine Kong; Kari Stefansson. 2005. «A common inversion under selection in Europeans». *Nature Genetics* 37 (2): 129-137.

Stent, Gunther. 1984. «From probability to molecular biology», *Cell* 36: 567-570.

Stevens, Kenneth N. 1972. «The quantal nature of speech: Evidence from articulatory-acoustic data». En: *Human Communication: A Unified View*, ed. Edward E. David, Jr. y Peter B. Denes, 51-66. Nueva York: McGraw-Hill.

—. 1989. «On the quantal nature of speech», *Journal of Phonetics* 17 (1/2): 3-45.

Striedter, Georg. 2004. *Principles of Brain Evolution*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.

Swallow, DalIas M. 2003. «Genetics of lactase persistence and lactose intolerance». *Annual Review of Genetics* 37: 197-219.

Számado, Szabolcs; Eors Szathmáry. 2006. «Selective scenarios for the emergence of natural Ianguage», *Trends in Ecology & Evolution* 679: 555-561.

Szathmáry, Eörs, 1996. «From RNA to language». *Current Biology* 6 (7): 764.

Szklarczyk, Damian; Andrea Franceschini; Stefan Wyder; Kristoffer Forslund; Davide Heller; Jaime Huerta-Cepas; Milan Simonovic; Alexander Roth; Alberto Santos; Kalliopi P Tsafou;Michael Kuhn; Peer Bork; Lars J Jensen; Christian von Mering. 2011. «The STRING database in 2011: Functional interaction networks of proteins, globally integrated and scored». *Nucleic Acids Research* 39: D561-D568.

Takahashi, Daniel Y.; Alicia Fenley; Yayoi Teramoto; Darshana Z. Narayan; Jeremy Borjon; P. Holmes; Asif A. Ghazanfar. 2015. «The developmental dynamics of marmoset monkey vocal production», *Science* 349 (6249): 734-748.

Tallerman, Maggie. 2014. «No syntax saltation in language evolution». *Language Sciences* 46: 207-219.

Tattersall,lan. 1998. *The Origin of the Human Capacity, the Sixty- Eighth James McArthur Lecture on the Human Brain*. Nueva York: American Museum of Natural History.

—. 2002. *The Monkey in the Mirror.* Nueva York: Harcourt.

—. 2006. «Becoming human: Evolution and the rise of intelligence». *Scientific American* (julio): 66-74.

—. 2008. «An evolutionary framework for the acquisition of symbolic cognition by *Homo sapiens*», *Comparative Cognition & Behavior Reviews* 3: 99-114.

—. 2010. «Human evolution and cognition». *Theory in Biosciences* 129 (2-3): 193-01.

Thompson, D'arcy Wentworth. [1917] 1942. *On Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press. [Versión en castellano: *Sobre el crecimiento y la forma. Madrid: Hermann Blume Ediciones, 1980.]*

Thompson, John N. 2013. *Relentless Evolution*. Chicago: University of Chicago Press.

Tishkoff, Sarah; Floyd A. Reed; Benjamin F. Voight; Courtney C. Babbitt; Jesse S. Silverman; Kweli Powell; Holly M. Mortensen. 2007. «Convergent adaptation of human lactase persistence in Africa and Europe», *Nature Genetics* 39 (1): 31-40.

Tomasello, Michael. 2009. UG is dead. *Behavioral and Brain Sciences* 32 (5): 470-471.

Trubetzkoy, Nikolay. 1939. *Grundzüge der Phonologie*. Góttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

—. 1969. *Principles of Phonology*. Trad. C. A. Baltaxe. Berkeley: University of California Press. [Versión en castellano: *Principios de fonología*. Madrid: Editorial Cincel, 1976.]

Turing, Alan; Claude W. Wardlaw. [1953] 1992. «Adiffusion reaction theory of orphogenesis», En: *The Collected Works of Alan Turing: Morphogenesis*. Ámsterdam: North-Holland.

Turner, John. 1984. «Why we need evolution by jerks». *New Scientist* 101: 34-35.

—. 1985. «Fisher's evolutionary faith and the challenge of mimicry». En: *Oxford Surveys in Evolutionary Biology 2*, ed. Richard Dawkins and Matthew Ridley, 159-196. Oxford: Oxford University Press.

Van Dyke, Julie; Clinton L. Johns. 2012. «Memory interference as a determinant of language comprehension». *Language and Linguistics Compass* 6 (4): 193-211.

Vargha-Khadem, Faraneh; David G. Gadian; Andrew Copp; Mortimer Mishkin. 2005. «FOXP2 and the neuroanatomy of speech and language». *Nature Reviews. Neuroscience* 6: 131-138.

Vernot, Benjamín; Joshua M. Akey. 2014. «Resurrecting surviving Neanderthal lineages from modern human genomes». *Science* 343 (6174): 1017-1021.

Vijay-Shanker, K.; J. David Weir; Aravind K. Joshi. 1987. «Characterizing structural descriptions produced by various grammatical formalisms». En: *Proceedings of the 25th Annual Meeting of the Association for Com-*

putational Linguistics (ACL), 104-111, Stanford, CA: Association for Computational Linguistics.

Vigneau, Nicolas-Roy; Virginie Beaucousin; Pierre-Yves Hervé; Hugues Duffau; Fabrice Crivello; Oliver Houdé; Bernard Mazoyer; Nathalie Tzourio-Mazoyer. 2006. «Meta-analyzing left hemisphere language areas: phonology, semantics, and sentence processing». *NeuroImage* 30 (4): 1414-1432.

Wallace, Alfred Russel. 1856. «On the habits of the Orang-utan of Borneo». *Annals & Magazine of Natural History* (June): 471-475.

—. 1869. «Sir Charles Lyell on geological climates and the origin of species», *Quarterly Review* (Abril): 359-392.

—. 1871. *Contributions to the Theory of Natural Selection*. 2.ª ed. Londres: Macmillan.

Wardlaw, Claude W. 1953. «A commentary on Turing's reactiondiffusion mechanism of morphogenesis». *New Physiologist* 52 (1): 40-47.

Warneken, Felix; Alexandra G. Rosati. 2015. Cognitive capacities for cooking in chimpanzees». *Proceedings of the Royal Society Series B* 282: 20150229.

Weinreich, Daniel M.; Nigel F. Delaney; Mark A. DePristo; Daniel L. Hartl. 2006. «Darwinian evolution can follow only very few mutational paths to fitter proteins», *Science* 7 (312): 111-114.

Wexler;Kenneth; Peter W. Culicover. 1980. *Formal Principles of Language Acquisition*. Cambridge, MA: MIT Press.

Whitney, William Dwight. 1893. *Oriental and Linguistic Studies*. vol. 1. Nueva York: Scribner.

—. 1908. *The Life and Growth of Language: An Outline of Linguistic Science*. Nueva York: Appleton.

Wood, Rachel; Thomas F. G. Higham; Trinidad De Torres; Nadine Tisnérat-Laborde; Hector Valladas; Jose E. Ortiz; Carles Lalueza-Fox. 2013. «A new date for the Neanderthals from El Sidrón cave (Asturias, northern Spain)». *Archaeometry* 55 (1): 148-158.

Woods, WilliamA. 1970. «Transition network grammars for natural language analysis», *Communications of the ACM* 13 (10): 591-606.

Wray, Gregory. 2007. «The evolutionary significance of *cis* -regulatory mutations», *Nature Reviews Genetics* 8: 206–216.

Wright, Sewall. 1948. *Evolution, organic.* 14.ª ed. vol. 8, 914-929. Encyclopaedia Britannica.

Yang, Charles. 2002. *Knowledge and Learning in Natural Language*. Nueva York: Oxford University Press.

—. 2013. «Ontogeny and phylogeny of language». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (16): 6324-6327.

Younger, Daniel H. 1967. «Recognition and parsing of context-free languages in time n3. *Information and Control* 10 (2): 189-208.

Zhou, Hang; Sile Hu; Rostislav Matveev; Qianhui Yu; Jing Li; Philipp Khaitovich; Li Jin; (2015). «A chronological atlas of natural selection in the human genome during the past half-million years». bioRxiv preprint June 19; 2015. doi: http://dx.doi.org/l0.1101/018929.